



**TESIS - TM 142501**

**STUDI NUMERIK 3D ALIRAN BRINE MELINTASI CETAKAN  
ES BALOK UNTUK MENGETAHUI KARAKTERISTIK  
ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS**

**ARRAD GHANI SAFITRA  
2114202003**

**DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.**

**PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI  
JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



**THESIS - TM 142501**

**NUMERICAL STUDY 3D BRINE FLOW ACROSS ICE CAN  
TO ANALYZE FLOW CHARACTERISTIC AND HEAT  
TRANSFER**

**ARRAD GHANI SAFITRA  
2114202003**

**SUPERVISOR  
Prof. Dr. Eng. Prabowo, M.Eng.**

**MASTER PROGRAMME  
CONVERSION OF ENERGY ENGINEERING  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016**



**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik (M.T.)  
di**

**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:  
ARRAD GHANI SAFITRA  
NRP. 21 14 202 003**

**Tanggal Ujian: 18 Juli 2016  
Periode Wisuda: September 2016**

**Disetujui oleh:**

**1. Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng.  
NIP. 19650505 199003 1 005**

  
( Pembimbing )

**2. Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc.  
NIP. 19660402 198903 1 002**

  
( Penguji )

**3. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, M.Sc.  
NIP.19531219 198103 1 001**

  
( Penguji )

**4. Ary Bachtiar Krishna P., S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19710524 199702 1 001**

  
( Penguji )

**Direktur Program Pascasarjana,**



  
**Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.  
NIP. 19601202 198701 1 001**

# STUDI NUMERIK 3D ALIRAN *BRINE* MELINTASI CETAKAN ES BALOK UNTUK MENGETAHUI KARAKTERISTIK ALIRAN DAN PERPINDAHAN PANAS

Nama Mahasiswa : Arrad Ghani Safitra  
NRP : 2114 202 003  
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng.

## ABSTRAK

Aliran *brine* yang melalui cetakan es balok (*ice can*) pada posisi tegak sangat menarik untuk diamati. Fenomena *heat transfer* yang terjadi di sekeliling cetakan akan berbeda dari posisi bagian atas hingga bagian bawah cetakan. Hal ini disebabkan adanya keunikan bentuk cetakan es balok yaitu dimensi bagian atas cetakan lebih besar daripada dimensi bagian bawahnya. Fenomena aliran yang melewati cetakan es balok ini juga berbeda dengan aliran melewati balok dengan dimensi yang seragam dari bagian atas sampai bagian bawah. Sehingga dalam penelitian ini dikaji fenomena yang terjadi pada aliran melintasi cetakan es balok dengan variasi bentuk penampang *square* dan *rectangular* pada kondisi dinding *ice can* menggunakan *temperature* konstan.

Penelitian ini dilakukan dengan kajian numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics (CFD)* komersial untuk menjelaskan visualisasi karakteristik aliran dan perpindahan panas pada cetakan es balok (*ice can*) dengan bentuk *square cylinder* dan *rectangular cylinder* yang tersusun secara *inlined*. Simulasi dilakukan agar dapat memberikan informasi mengenai fenomena yang terjadi pada daerah sekitar dinding *ice can* dengan memberikan input aliran *brine* sebesar  $V_{\infty} = 0,05$  m/s yang mengalir secara *crossflow* melintasi *ice can* pada kondisi batas *temperature* konstan  $T_s = 0^{\circ}\text{C}$ .

Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa kecepatan aliran tertinggi terjadi pada geometri *square* pada celah antar *can* pada posisi  $y = 0$  pada  $x/D = 0.5$  untuk *ice can* 1 dengan  $u/U_{\max} = 0.75$ . Perpindahan panas tertinggi direpresentasikan dengan *Nusselt number average* dimiliki oleh geometri *square* yang mempunyai nilai *surface Nusselt number average* dan *surface heat transfer coefficient* sebesar 567.91 dan 254.99 ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ).

**Kata kunci :** *ice can, square cylinder, rectangular cylinder, inlined, temperature konstan*



## NUMERICAL STUDY 3D *BRINE* FLOW ACROSS ICE CAN TO ANALYZE FLOW CHARACTERISTIC AND HEAT TRANSFER

Name : Arrad Ghani Safitra  
NRP : 2114 202 003  
Supervisor : Prof. Dr. Eng. Prabowo, M. Eng.

### ABSTRACT

Brine flow through ice can of in the upright position is very interesting to study. Heat transfer phenomena that occur around ice can will be different from the position of the top to the bottom. Due to the unique shape of ice can where the top mold dimensions larger than the dimension of the bottom, then it very unique to analyze. The phenomenon of flow passing through the ice can is also different from the beam with uniform dimensions from top to bottom. Therefore, this research is investigated phenomena of flow across the ice can with a variation of square and rectangular cross sectional shape using constant temperature conditions on the wall of ice can.

This research was conducted by numerical studies using commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) to describe the characteristics of flow and heat transfer in ice can with square cylinder and rectangular cylinder inline arrangement. The simulation was performed in order to provide information on the phenomenon that occurs in surrounding of ice can wall by input brine flow,  $V_{\infty} = 0.05$  m/s cross flow through ice can at constant temperature  $T_s = 0^{\circ}\text{C}$ .

Result shows that the highest flow rate in the square geometry with the gap of ice can at the position of  $y = 0$  and  $x/D$  0.5 for *ice can* 1 with  $u/U_{\max} = 0.75$ . Then, for the highest heat transfer as represented by surface Nusselt number average at the same geometry and surface heat transfer coefficient is 567.91 and 254.99  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

**Keywords:** ice can, square cylinder, rectangular cylinder, inlined, constant temperature

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN .....	i
ABSTRAK .....	ii
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL .....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	5
1.3 Batasan Masalah .....	5
1.4 Tujuan Penelitian .....	5
1.5 Manfaat Penelitian .....	6
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Dasar Teori.....	7
2.1.1 Aliran Melintasi <i>Tube Bank</i> .....	7
2.1.2 Model Matematis <i>Fluid Flow</i> .....	10
2.2 Kajian Pustaka .....	10
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....	19
3.1 Geometri Model Dan <i>Computational Domain</i> .....	19
3.2 <i>Grid Independency</i> .....	24
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	27
4.1 Posisi Dan Cara Pengambilan Data .....	27
4.2 Karakteristik Aliran Pada Cetakan Es Balok ( <i>Ice Can</i> ) .....	28
4.2.1 Analisa Fenomena Fisis Dan Karakteristik Aliran Melintasi Cetakan Es Balok Pada <i>XZ-Plane</i> .....	28

4.2.2	Profil Kecepatan Pada Celah Antar <i>Ice Can</i> di <i>XZ-Plane</i> .....	35
4.2.3	Analisa Fenomena Fisis Dan Karakteristik Aliran Melintasi Cetakan Es Balok Pada <i>XY-Plane</i> .....	37
4.2.4	Perbandingan Kecepatan Aktual Dan Simulasi.....	39
4.3	Karakteristik Perpindahan Panas Pada Cetakan Es Balok ( <i>Ice Can</i> ) ....	40
4.3.1	Analisa Fenomena Fisis Perpindahan Panas Pada Cetakan Es Balok.....	40
4.3.2	Analisa Perbandingan <i>Nusselt number</i> Lokal Dan <i>Average</i> Pada Cetakan Es Balok.....	43
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>		<b>51</b>
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran .....	52
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	<i>Layout</i> pabrik es balok .....	2
Gambar 1.2	Cetakan es balok yang tersusun <i>inlined</i> .....	3
Gambar 2.1	Susunan <i>tube bank</i> secara <i>inlined</i> untuk <i>square cylinder</i> .....	7
Gambar 2.2	Domain komputasi untuk aliran disekitar <i>square cylinder</i> .....	12
Gambar 2.3	<i>Nusselt number (time-averaged for the periodic flow)</i> untuk silinder and masing – masing <i>face</i> sebagai fungsi <i>Reynolds numbe</i> . .....	12
Gambar 2.4	<i>Local Nusselt number</i> sepanjang permukaan silinder untuk $Re = 1$ dan $Re = 45$ pada <i>Prantdl number</i> yang berbeda .....	14
Gambar 2.5	<i>Representatif</i> profil <i>streamline</i> pada $Re = 0,1$ , $10$ dan $40$ untuk (A) untuk $n = 1,0$ (B) untuk $n = 0,2$ [9] .....	15
Gambar 2.6	Variasi koefisien tekanan, $C_p$ dengan <i>Reynolds number</i> dan <i>power-law index</i> [9] .....	16
Gambar 2.7	Variasi <i>local Nusselt number</i> dengan <i>Prantdl number</i> , (A) pada $Re = 0.1$ , (B) pada $Re = 40$ [9] .....	17
Gambar 3.1	Geometri cetakan es balok dengan pandangan <i>isometri</i> (a) Bentuk penampang <i>square</i> dan (b) Bentuk penampang <i>rectangular</i> .....	20
Gambar 3.2	Domain dan kondisi batas pemodelan untuk geometri <i>square cylinder</i> secara 3 dimensi .....	21
Gambar 3.3	<i>Meshing hexahedron map</i> dengan pandangan <i>top</i> , <i>front</i> , dan <i>side</i> untuk geometri <i>square cylinder</i> .....	22
Gambar 3.4	Grafik perbandingan $Nu$ lokal pada permukaan <i>upstream cylinder</i> untuk ke-lima macam <i>mesh</i> .....	24
Gambar 4.1	Posisi pengambilan data pada (a) <i>XZ-plane</i> dengan posisi $y = 1$ ; $y = 0,5$ ; $y = 0$ dan (b) <i>XY-plane</i> dengan posisi $z = 0$ ; $z = 0,095$ .....	27
Gambar 4.2	Kontur kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 1$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	28
Gambar 4.3	Kontur kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 0,5$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	29



Gambar 4.4	Kontur kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 0$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	30
Gambar 4.5	<i>Streamlines</i> dan vektor kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) pada (a) Geometri <i>square</i> dan (b) Geometri <i>rectangular</i> dengan posisi $y = 1$ .....	31
Gambar 4.6	<i>Streamlines</i> dan vektor kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) pada (a) Geometri <i>square</i> dan (b) Geometri <i>rectangular</i> dengan posisi $y = 0,5$ .....	33
Gambar 4.7	<i>Streamlines</i> dan vektor kecepatan tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) pada (a) Geometri <i>square</i> dan (b) Geometri <i>rectangular</i> dengan posisi $y = 0$ .....	34
Gambar 4.8	Profil kecepatan di celah antar <i>ice can</i> tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) pada <i>ice can</i> 1 untuk geometri <i>square</i> dan geometri <i>rectangular</i> dengan posisi (a) $y = 1$ , (b) $y = 0.5$ , dan (c) $y = 0$ .....	36
Gambar 4.9	(a) Kontur kecepatan pada geometri <i>square</i> pada posisi $z = 0,095$ dan (b) <i>pathline</i> dengan vektor kecepatan serta (c) Kontur kecepatan pada geometri <i>rectangular</i> pada posisi $z = 0,075$ dan (d) <i>pathline</i> dengan vektor kecepatan .....	37
Gambar 4.10	Perbandingan distribusi kecepatan aktual dan simulasi pada geometri <i>square</i> .....	39
Gambar 4.11	Kontur temperatur tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 1$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	40
Gambar 4.12	Kontur temperatur tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 0,5$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	41
Gambar 4.13	Kontur temperatur tampak atas ( <i>XZ-plane</i> ) dengan posisi $y = 0$ untuk bentuk (a) <i>Square</i> dan (b) <i>Rectangular</i> .....	42
Gambar 4.14	<i>Nusselt number</i> lokal (a) <i>Ice can</i> 1, (b) <i>Ice can</i> 2, (c) <i>Ice can</i> 3 pada posisi $y = 1$ ; $y = 0,5$ ; $y = 0$ untuk penampang <i>square</i> .....	443
Gambar 4.15	<i>Nusselt number</i> lokal (a) <i>Ice can</i> 1, (b) <i>Ice can</i> 2, (c) <i>Ice can</i> 3 pada posisi $y = 1$ ; $y = 0,5$ ; $y = 0$ untuk penampang <i>rectangular</i> .....	45

Gambar 4.16 Perbandingan <i>Nusselt number</i> lokal untuk penampang <i>square</i> dan <i>rectangular</i> (a) <i>Ice can</i> 1, (b) <i>Ice can</i> 2, (c) <i>Ice can</i> 3 pada posisi $y = 1$ ; $y = 0,5$ ; dan $y = 0$ .....	48
--	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Konstanta untuk persamaan 2.1 pada <i>tube bank</i> .....	9
Tabel 2.2	<i>Correction factor</i> ( $C_2$ ) persamaan 2.4 pada $N_L < 20$ ( $Re_{Dh,max} \geq 0^3$ ) . .	9
Tabel 3.1	Ukuran geometri <i>ice can</i> dan domain simulasi .....	20
Tabel 3.2	Penamaan dan nilai kondisi batas.....	21
Tabel 3.3	Perbandingan propertis ( $H_2O_{(l)}$ ) dan <i>ethylene glycol</i> ( $C_2H_6O_2$ ) .....	23
Tabel 3.4	Propertis <i>Aluminium</i> (Al) .....	23
Tabel 3.5	Penentuan parameter kendali .....	23
Tabel 3.6	<i>Grid independency</i> .....	24
Tabel 4.1	<i>Surface Nusselt number</i> pada permukaan <i>ice can</i> geometri <i>square</i> ...	47
Tabel 4.2	<i>Surface Nusselt number</i> pada permukaan <i>ice can</i> geometri <i>rectangular</i> .....	47
Tabel 4.3	Nilai <i>surface Nusselt number</i> pada semua <i>ice can</i> .....	47



---

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

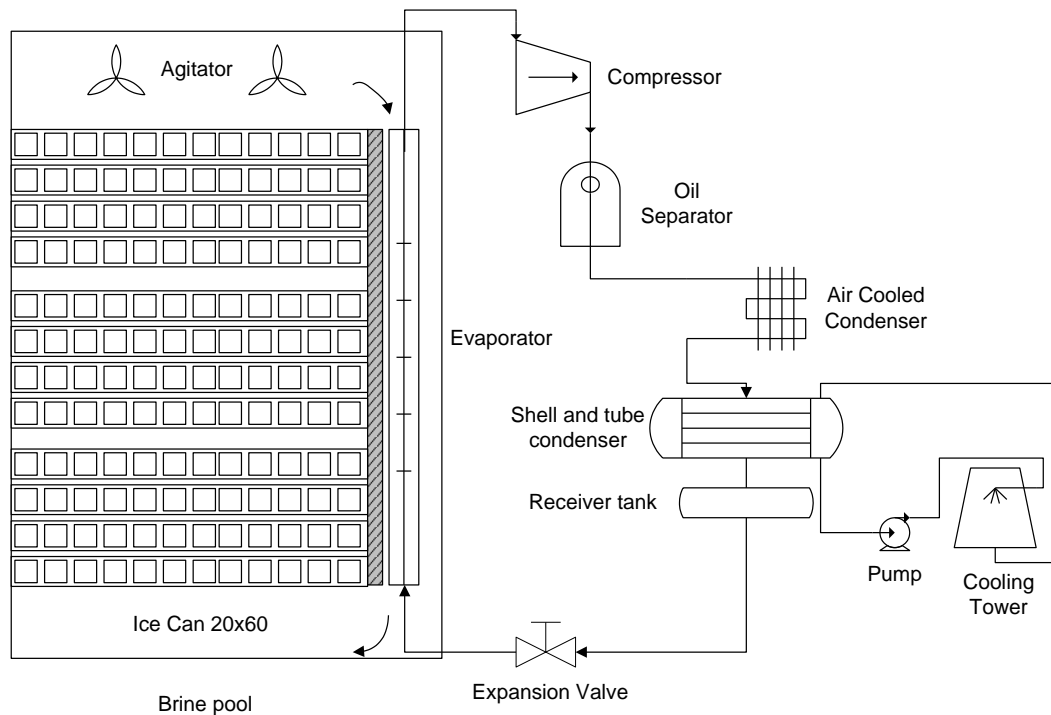
Sistem produksi dapat dikatakan baik apabila selalu dapat memenuhi permintaan dari setiap konsumennya dengan keterbatasan-keterbatasan sumber daya yang ada. Sumber daya yang dimaksud adalah mesin, material, manusia dan informasi. Semakin besarnya permintaan produksi es balok untuk memenuhi kebutuhan pengawetan makanan memerlukan industri es balok dengan kapasitas produksi yang besar.

Pabrik Es balok Pasar Turi merupakan salah satu produsen es balok di Surabaya dengan kapasitas produksi sekitar 30 Ton per hari (1200 es balok) dengan kapasitas kompresor 125 HP. Produsen es ini juga mensupply es balok baik bagi pengusaha *home industry*, warung dan pertokoan yang memanfaatkan es balok sebagai bahan baku.

Siklus pembuatan es balok secara umum terpapar pada Gambar 1.1 yang terdiri dari 2 siklus, yaitu siklus dari refrigerasi sebagai pendingin dan siklus pembuatan es balok. Siklus refrigerasi yang dipaparkan pada Gambar 1.1 sama dengan siklus refrigerasi secara umum. Dimulai dari pemampatan refrigeran berupa *gas*, dalam hal ini menggunakan jenis amonia hingga mencapai tekanan kondensor kemudian dikondensasikan pada kondensor dengan tujuan merubah fase dari *gas* menjadi *liquid* dengan sedikit terjadi penurunan tekanan dan temperatur. Kemudian refrigeran berupa *liquid* ini akan melewati *expansion valve* untuk diturunkan tekanannya dari tekanan kondensor ke tekanan evaporator yang diikuti dengan penurunan temperatur. Setelah tekanan dan temperatur turun refrigeran memasuki evaporator untuk diubah fasenya dari *liquid* menjadi *gas* dan kembali lagi ke kompresor untuk di mampatkan kembali. Sedangkan siklus pembuatan es balok yaitu *brine* yang telah didinginkan oleh evaporator yang berisi amonia hingga mencapai temperatur  $-8^{\circ}\text{C}$  mengalir menuju *brine tank/brine pool*. Pada *brine pool* ini terdapat cetakan es balok (*ice can*) yang tersusun secara *inlined* seperti yang terpapar pada Gambar 1.2. *Brine* mengalir melewati celah-celah cetakan dengan



aliran yang pelan (laminer). Setelah mengalir melewati 1200 cetakan es balok *brine* mengalir menuju *agitator* untuk diaduk agar garam yang terlarut tidak menggumpal.



Gambar 1.1 *Layout* pabrik es balok

Metode yang digunakan di dalam sebuah pabrik es merupakan metode sederhana yaitu mendinginkan air yang ada di dalam cetakan es (*ice can*) dengan air garam terlarut (*brine*) pada kolam *brine*. Untuk mengubah air menjadi es diperlukan aliran *brine* guna menyerap panas yang ada di dalam air tersebut, untuk menghindari penggumpalan *brine* diperlukan agitator sebagai pengaduk *brine*. Temperatur *brine* yang mengalir sekitar  $-8^{\circ}\text{C}$  untuk mendinginkan air sehingga menjadi balok es di dalam cetakan es (*ice can*). *Ice can* kemudian dikeluarkan dari *brine tank* dan dicairkan untuk waktu yang singkat dalam tangki air untuk melepaskan balok es dari *ice can*. Masa pembekuan biasanya sekitar 16-24 jam meskipun periodenya terlihat cepat hanya beberapa jam saja beku.

Aliran *brine* yang melalui cetakan es balok (*ice can*) yang berbentuk balok tegak sangat menarik untuk diamati. Fenomena *heat transfer* yang terjadi di

sekeliling cetakan berbeda dari posisi bagian atas hingga bagian bawah cetakan. Hal ini disebabkan adanya keunikan bentuk cetakan es balok yaitu dimensi bagian atas cetakan lebih besar daripada dimensi bagian bawahnya. Fenomena aliran yang melewati cetakan es balok ini juga berbeda dengan aliran melewati balok biasa dengan dimensi yang seragam dari bagian atas sampai bagian bawah. Fenomena aliran tersebut menyebabkan perpindahan panas yang terjadi pun berbeda jika dibandingkan dengan perpindahan panas pada balok biasa.



Gambar 1.2 Cetakan es balok yang tersusun *inlined*

Studi tentang aliran melewati *bluff body* dengan bentuk *square cylinder* dengan susunan *inlined* telah banyak dilakukan baik secara 2 dimensi maupun 3 dimensi. Ahmed dan Yovanovich [1] melakukan studi eksperimental tentang karakteristik perpindahan panas konveksi paksa dari *isothermal bodies* pada berbagai bentuk yang berbeda pada  $10^4 \leq Re \leq 10^5$  dan Pr number 0.71. Berdasarkan kombinasi dari hasil eksperimen dan analisa pendekatan lapis batas[2], Yovanovich mengembangkan studi empiris terhadap sirkular dan *square* silinder atau toroid, pada rentang *Reynolds number*  $Re \leq 6 \times 10^6$ . Hasil eksperimental menunjukkan kesamaan yang baik ketika dibandingkan dengan studi sebelumnya. Akan tetapi, pada studi ini tidak dibandingkan antara toroid sirkular dan toroid *square* karena tidak didokumentasikan dengan baik dan tidak ada data yang tersedia dalam literatur.





Studi numerik 2-D yang mempelajari karakteristik perpindahan panas pada *square* silinder juga dilakukan oleh Paliwal et al. [3]. Paliwal meneliti aliran *steady* pada rentang  $5 \leq Re \leq 40$  dari cairan *power-law* yang melewati *square* silinder dengan *finite difference method* pada sebuah susunan grid yang *staggered* dan *uniform* ( $\beta = 1/15$ ). Di sisi lain, dari jumlah Prandtl hingga  $\sim 100$  yang sering ditemui dalam aplikasi industri kimia, minyak bumi dalam pengolahan cairan organik (glikol, gliserol). Selanjutnya, karena viskositas proses tersebut umumnya tinggi, *Reynolds number*nya tidak terlalu tinggi. Asumsi aliran 2-D di bawah kondisi untuk  $Re < 45$ . Penggunaan fluida berupa udara juga telah dilakukan oleh Sharma [4] secara 2-D pada *square* silinder dengan *range*  $1 \leq Re \leq 160$ . Pembagian *scope*  $Re \leq 40$  *steady* sedangkan  $Re > 160$  *unsteady*. Hasilnya, Von Karman *shedding vortices* mengakibatkan gerakan olakan pada daerah isotherms saat meregang dan menipis. Hal ini menyebabkan perubahan besar dalam bentuk *isotherm* bahkan waktu rata-rata di region sirkulasi dibandingkan dengan kasus aliran *steady* dan mekanisme transfer panas dari belakang silinder berbeda secara signifikan dalam dua jenis aliran. *Nusselt number* meningkat seiring peningkatan *Reynolds number*. Untuk temperatur dan *heat flux* konstan, *Nusselt number* tertinggi terletak pada permukaan *square* silinder depan, pada permukaan atas dan bawah *Nusselt number* tidak tinggi melainkan nilai tengah, dan *Nusselt number* terendah adalah pada permukaan belakang.

Fokus dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik aliran dan perpindahan panas dari *bluff body* dengan bentuk *square cylinder* dan *rectangular cylinder* dengan  $V_\infty$  *brine* yang mengalir secara *crossflow* pada kondisi batas *temperature* konstan pada dinding cetakan es balok. Studi ini menggunakan cairan *brine* berbahan dasar *ethyleneglycol*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan pendekatan studi kasus. Diawali dengan membuat gambaran secara sistematis, aktual dan akurat mengenai suatu *square cylinder* yang diselidiki secara simulasi numerik 3 dimensi kemudian melakukan analisa terhadap karakteristik aliran dan perpindahan panasnya secara 2 dimensi.



## 1.2 Perumusan Masalah

Aliran yang melewati cetakan es balok (*ice can*) mempunyai fenomena yang berbeda dengan aliran melalui balok biasa karena dimensi bagian atas cetakan lebih besar daripada dimensi bagian bawahnya. Oleh karena itu perlu dilakukan studi untuk mengetahui fenomena tersebut dengan kondisi dinding cetakan es balok yang mempunyai *temperature* konstan. Sehingga dirumuskan bagaimana fenomena pengaruh *temperature* konstan pada *square cylinder* dan *rectangular cylinder* ini terhadap karakteristik aliran fluida (*brine*) dan perpindahan panas yang terjadi dari cetakan es balok ke *brine* dengan aliran secara *crossflow* menggunakan simulasi 3 dimensi.

## 1.3 Batasan Masalah

Ada beberapa batasan masalah yang ditetapkan untuk memperjelas ruang lingkup dan analisa dalam penelitian, antara lain:

- a. Fluida kerja yang digunakan di dalam simulasi ini adalah *brine* dengan nama kimia *ethyleneglycol*.
- b. Penelitian dilakukan secara numerik terhadap *ethyleneglycol* dengan *brine* yang mengalir secara *crossflow* terhadap geometri *square* dan *rectangular* menggunakan simulasi 3 dimensi dengan kondisi *steady state*.
- c. Analisa dilakukan terhadap fluida kerja berupa *ethyleneglycol* secara 2 dimensi berdasarkan hasil simulasi secara 3 dimensi menggunakan *software* CFD komersial.
- d. Kondisi dinding cetakan (*ice can*) menggunakan *temperature* konstan dengan kondisi 0°C (mulai proses pembekuan).
- e. Fluida kerja berupa *brine* yang mengalir di luar *ice can* adalah dalam kondisi *steady*, *incompressible* dan *single phase*.
- f. Propertis dari material *ice can* dianggap konstan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Ada beberapa tujuan dari penelitian yang akan dilakukan yaitu:

1. Mengetahui fenomena aliran yang terjadi di sekitar cetakan es balok (*ice can*) dengan bentuk penampang *square cylinder* dan *rectangular cylinder*.



2. Mengetahui perpindahan panas yang terjadi pada cetakan es balok (*ice can*) dengan bentuk penampang *square cylinder* dan *rectangular cylinder*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan gambaran secara kuantitatif, kualitatif, dan komparatif mengenai karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *square cylinder* dan *rectangular cylinder* dengan  $V_\infty$  yang mengalir secara *crossflow* menggunakan simulasi 3 dimensi.
2. Sebagai referensi untuk melengkapi penelitian sebelumnya tentang studi numerik karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *square cylinder* dan *rectangular cylinder*.



## BAB 2

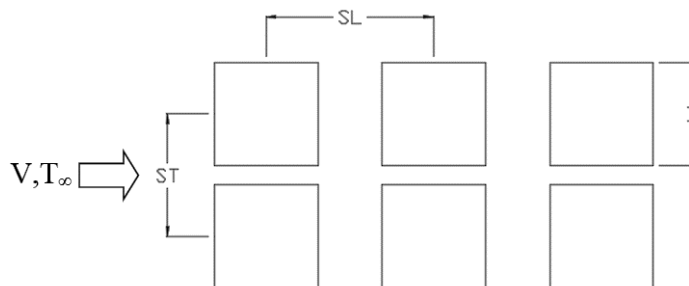
### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini akan diuraikan dasar teori dan beberapa hasil penelitian terdahulu yang membahas tentang karakteristik aliran dan perpindahan panas pada *bluff body* dengan bentuk *square cylinder* dan *rectangular cylinder*. Pada penelitian ini menggunakan simulasi secara 3 dimensi dengan analisa data simulasi secara 2 dimensi untuk mempermudah dalam perhitungan dan analisa.

#### 2.1 Dasar Teori

##### 2.1.1 Aliran Melintasi *Tube Bank*

Perpindahan panas ke atau dari kumpulan beberapa *tube* (*tube bank*) secara *cross flow* sangat relevan digunakan untuk perhitungan pada aplikasi industri diantaranya pada *boiler* atau pada *coil* pendingin dari sebuah pengkondisi udara. Struktur aliran di sekitar *tube bank* sangat dipengaruhi oleh *tube-tube* di sekelilingnya [5]. *Tube bank* mempunyai 2 macam susunan *tube*, yaitu secara *inlined* dan *staggered* searah kecepatan dari aliran fluida. Pada kasus aliran melintasi cetakan es balok yang dibahas pada penelitian ini, pendekatan dilakukan dengan menggunakan aliran melintasi *tube bank* dengan susunan *inlined*. Pada *tube* yang tersusun secara *inlined* parameter geometri yang digunakan adalah diameter ( $D$ ), *transverse pitch* ( $S_T$ ), dan *longitudinal pitch* ( $S_L$ ). Karakteristik aliran melintasi *tube bank* akan didominasi oleh *boundary layer separation effect* dan *wake interactions* antar *tube* yang akan berpengaruh terhadap *convection heat transfer* [5]. Konfigurasi susunan *inlined* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Susunan *tube bank* secara *inlined* untuk *square cylinder*



Bentuk *tube bank* yang dimaksud dalam penelitian ini adalah berbentuk *non-circular* atau lebih tepatnya *square cylinder*, maka digunakan diameter hidrolis ( $D_h$ ) untuk analisa selanjutnya. Diameter hidrolis dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (2.1)$$

Dimana :  $A$  = Luas penampang  
 $P$  = keliling penampang

Untuk menghitung besar *average heat transfer coefficient* secara keseluruhan pada *tube banks*, maka dapat menggunakan *Zukauskas correlation* yang dirumuskan dalam persamaan 2.1 sebagai berikut [5]:

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{D,max}^m Pr^{0,36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (2.2)$$

Dengan syarat:

$$N_L \geq 20$$

$$0.7 \leq Pr \leq 500$$

$$1000 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^6$$

*Reynolds number maximum* ( $Re_{D,max}$ ) yang dimaksud adalah berdasarkan kecepatan maksimum ( $V_{max}$ ) fluida yang terjadi disusunan *tube bank*. Pada *tube* dengan susunan *inlined*,  $V_{max}$  dapat terjadi di *transverse plane* ( $A_1$ ) sesuai Gambar 2.1, dan untuk menghitung besarnya  $V_{max}$  pada *plane*  $A_1$  digunakan persamaan sebagai berikut:

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2.3)$$

Dan untuk menghitung  $Re_{D,max}$ ,

$$Re_{D,max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (2.4)$$

Seluruh *properties* dari fluida kecuali  $Pr_s$  dievaluasi menggunakan temperatur rata-rata antara *inlet* dan *outlet*, sedangkan konstanta  $C_1$  dan  $m$  pada persamaan 2.1 dipaparkan dalam Tabel 2.1. Jika  $N_L < 20$ , maka *correction factor*



dapat ditambahkan dalam persamaan 2.1 seperti yang dijabarkan pada persamaan berikut [5].

$$\overline{Nu}_{D|N_L < 20} = C_2 \overline{Nu}_{D|N_L < 20} \quad (2.5)$$

Dimana, konstanta  $C_2$  dituliskan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Konstanta untuk persamaan 2.1 pada *tube bank*[5]

Konfigurasi	$Re_{Dh,max}$	$C_1$	$m$
<i>Inlined</i>	$10-10^2$	0,80	0,40
<i>Staggered</i>	$10-10^2$	0,90	0,40

Tabel 2.2 *Correction factor* ( $C_2$ ) persamaan 2.4 pada  $N_L < 20$  ( $Re_{D,max} \geq 10^3$ ) [5]

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13	16
<i>Inlined</i>	0,70	0,80	0,86	0,90	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99
<i>Staggered</i>	0,64	0,76	0,84	0,89	0,92	0,95	0,97	0,98	0,99

Selanjutnya, hasil dari persamaan 2.4 dapat digunakan untuk menghitung *convection heat transfer coefficient* sebagai berikut.

$$\bar{h} = \overline{Nu}_D \frac{k_f}{D} \quad (2.6)$$

Sehingga *heat transfer rate* per unit *length* pada *tube* dapat dievaluasi menggunakan persamaan berikut.

$$q' = N(\bar{h}\pi D \Delta T_{lm}) \quad (2.7)$$

Dimana,  $\Delta T_{lm}$  merupakan *log mean temperature difference* yang dapat dihitung dari parameter temperatur *inlet*, *outlet*, dan permukaan *tube*. Adapun persamaannya dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_s - T_i) - (T_s - T_o)}{\ln\left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o}\right)} \quad (2.8)$$

Untuk temperatur *outlet* yang belum diperoleh datanya dapat diprediksi secara empiris menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_i} = \exp\left(-\frac{\pi D N \bar{h}}{\rho V N_T S_T C_p}\right) \quad (2.9)$$





### 2.1.2 Model Matematis *Fluid Flow*

Persamaan yang mengatur tentang fenomena aliran fluida merupakan *mathematical statement* dari *conservation law of physics* yang mendefinisikan bahwa fluida bersifat *continuity*, laju perubahan momentum sama dengan penjumlahan gaya dari *fluid particle*, dan laju perubahan energi sama dengan penjumlahan energi yang masuk dengan energi yang keluar dari *fluid particle*. Untuk fluida *incompressible*, aliran melintas *square cylinder* secara 3 dimensi mempunyai persamaan *continuity*, momentum, dan energi dituliskan dalam bentuk sebagai berikut.

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

Persamaan momentum arah x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

Persamaan momentum arah y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

Persamaan momentum arah z:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.13)$$

Persamaan energi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} = \frac{1}{Pe} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.14)$$

## 2.2 Kajian Pustaka

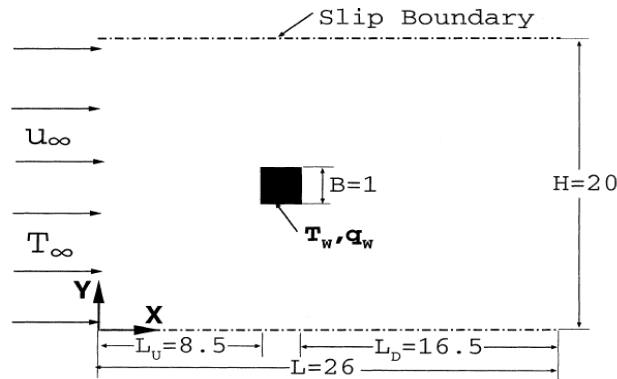
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada aliran yang melintasi *bluff body*, baik itu untuk kepentingan akademik maupun industri. Bentuk *geometri body* yang sering digunakan adalah berbentuk *circular cylinder*. Gerakan fluida yang melewati *circular cylinder* banyak kita lihat aplikasinya pada struktur bangunan-bangunan yang menggunakan bentuk-bentuk dasar *bluff body* seperti jembatan, cerobong asap, sistem perpipaan, cooling tower, tiang, struktur penyangga anjungan lepas pantai, dan lain sebagainya.



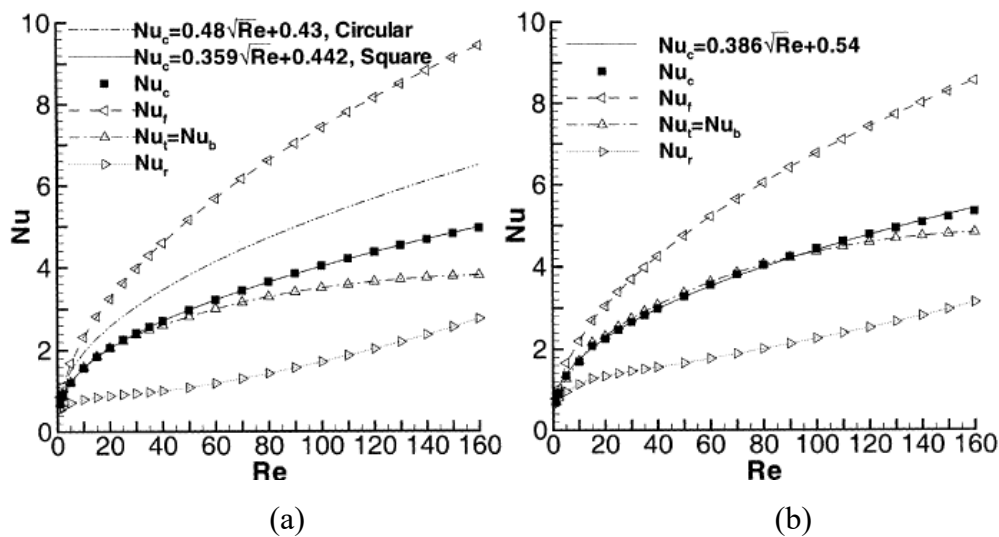
Sebuah *bluff body*, dalam keadaan normal, memisahkan dari bagian besar permukaan *body* sehingga menciptakan *wake region* di bagian *downstream*. Selama satu dekade terakhir, *flow around bluff body* menimbulkan masalah mekanika fluida sekaligus tantangan yang melibatkan interaksi tiga lapisan geser, *boundary layer*, *separating free shear layer*, dan *wake*, yang masing – masing dengan proses berbeda atau digabungkan mengembangkan ketidakstabilan akibat dari peningkatan *Reynolds number*. Aliran sangat berkontribusi penting dalam aplikasi teknik. Sifat aliran menentukan kinerja perangkat yang mempengaruhi kekuatan, getaran, atau perpindahan panas untuk banyak aplikasi *engineering*. *Bluff body* menginduksi aliran *unsteady* dan pencampuran dapat digunakan untuk meningkatkan perpindahan panas dan massa antara *body* dan *surrounding*.

Kebanyakan penelitian di masa lalu difokuskan pada silinder sirkular. Ulasan yang sangat baik pada konfigurasi ini diantaranya ditulis oleh Zdravkovich [7]. Aliran melewati *square cylinder* menyerupai aliran melewati silinder sirkular sejauh ketidakstabilan dipelajari pada penelitian ini, tetapi mekanisme separasi dan ketergantungan akibat dari *shedding frequency* dan gaya aerodinamik pada *Reynolds number* berbeda secara signifikan. Tidak seperti silinder sirkular, titik – titik pemisahan silinder persegi tetap pada *leading* atau *trailing edges*. Selanjutnya, lebar *wake* dibelakang silinder setidaknya satu diameter, sedangkan kurang dari setengah diameter dalam kasus silinder. Akibatnya Von Karman *vortex* terbentuk lebih signifikan lebih luas untuk *square cylinder* daripada silinder sirkular. Dengan demikian aliran disekitar *square cylinder* merupakan masalah dasar yang sangat penting dan menarik dalam aplikasi rekayasa.

Objek dari penelitian Sharma dan Eswaran [4] adalah untuk mempelajari *free stream flow over square cylinder* dan mengkaji hubungan antara perpindahan panas dan berbagai laminar 2D *flow regime* untuk dua kondisi batas seragam: temperatur konstan dan *heat flux* konstan. Meskipun *flow regime* telah dipelajari sebelumnya, *steady* dan *unsteady heat transfer* dari *square cylinder* belum banyak dieksplorasi. Tujuan dari penelitian Sharma adalah untuk menghasilkan *database* numerik untuk parameter aliran dan perpindahan panas sehubungan dengan *Reynolds number* dan untuk mengembangkan korelasi perpindahan panas antara *Nusselt number* dan *Reynolds number* dalam rezim untuk kondisi batas yang telah ditentukan.



Gambar 2.2 Domain komputasi untuk aliran disekitar *square cylinder*



Gambar 2.3 *Nusselt number* (time-averaged for the periodic flow) untuk silinder and masing – masing *face* sebagai fungsi *Reynolds number* untuk (a) temperatur konstan dan (b) *heat flux* konstan. (Subscripts: f, front; t, top; r, rear; b, bottom; c, *cylinder average*)

Gambar 2.3 menunjukkan variasi rata-rata *Nusselt number* dari setiap permukaan secara terpisah dibandingkan dengan *Reynolds number* untuk kedua kondisi batas yang digunakan. Permukaan depan secara konsisten menampilkan *Nusselt number* tertinggi, permukaan atas dan bawah adalah menengah diikuti oleh permukaan belakang. *Nusselt number* bagian belakang sangat tergantung pada *Reynolds number* dalam aliran *unsteady* dan periodik jika dibandingkan dengan *steady flow regime*, seperti diindikasikan dengan peningkatan kemiringan kurva pada *unsteady regime*. Akan tetapi, tren sebaliknya diamati pada permukaan



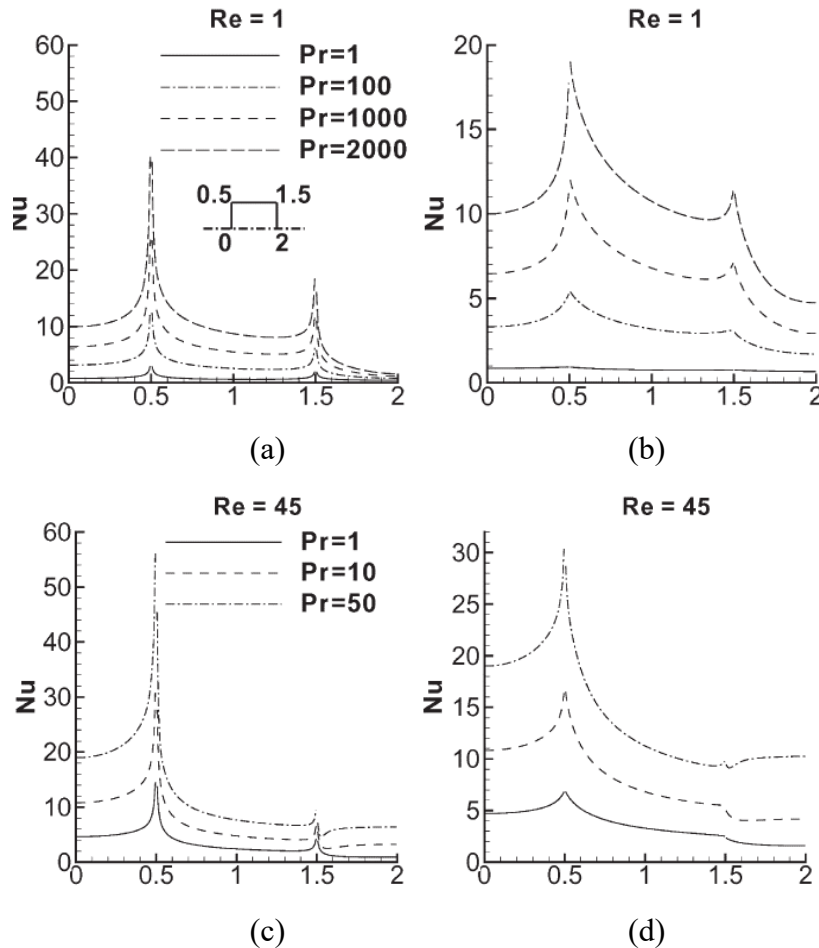
lainnya. Oleh karena itu, tampak bahwa efek *vortex shedding* pada perpindahan panas silinder dirasakan terutama oleh permukaan belakang karena pemisahan terjadi di *trailing edge* silinder untuk *time average* pada bidang aliran *Reynolds number* *unsteady*, kecuali pada  $Re = 160$ . Gambar 2.3(a) menunjukkan bahwa *Nusselt number* untuk silinder lebih besar dibandingkan *Nusselt number* pada permukaan atas dalam rezim aliran periodik. Sharma me-reference penelitian Eckert yang menyatakan bahwa *Nusselt number* untuk setiap 2D lapis batas laminar sebanding dengan akar kuadrat dari *Reynolds number* selama ketebalan *boundary layer* dianggap kecil. Sebuah korelasi yang sama untuk kasus *heat flux* konstan dengan deviasi maksimum 4% yang di plot pada gambar 2.3b.

Studi lain tentang aliran melewati *bluff body* dengan bentuk *square cylinder* juga dilakukan oleh Dhiman *et al.* [8] melakukan studi numerik tentang karakteristik perpindahan panas secara 2 D pada *square* silinder dengan *range*  $1 \leq Re \leq 160$ . Pembagian *scope*  $Re \leq 40$  *steady* sedangkan  $Re > 160$  *unsteady*. Berbeda dengan Sharma yang menggunakan fluida udara, Dhiman melakukan studi numerik menggunakan cairan seperti glikol, minyak zaitun, gliserol dll yang penting dalam industri perminyakan. Untuk aplikasi industri pengolahan cairan organik (glikol, gliserol) dan fraksi minyak bumi karena viskositas umumnya tinggi pada proses aliran tersebut, *Reynolds number* tidak terlalu tinggi. Asumsi aliran 2D juga dibenarkan untuk kondisi  $Re < 45$ . Tujuan utama penelitian Dhiman adalah untuk mempelajari pengaruh jumlah *Prandtl number* ( $0.7 \leq Pr \leq 4000$ ) pada karakteristik perpindahan panas *square cylinder* kisaran *Reynolds number*  $1 \leq Re \leq 45$  pada *steady crossflow regime*. Nilai numerik dari *Nusselt number* untuk mengembangkan korelasi perpindahan panas untuk temperatur silinder konstan dan *heat flux* konstan pada kondisi batas *solid square cylinder* pada variasi *Prandtl number*. Oleh karena itu, penelitian Dhiman mengabaikan pengaruh variasi parameter seperti kepadatan, panas spesifik, konduktivitas termal, faktor *buoyancy* juga belum dipertimbangkan disini.

Variasi lokal *Nusselt number* untuk bagian atas silinder persegi di sepanjang permukaan silinder (depan, atas, dan permukaan belakang) untuk kondisi suhu konstan pada  $Re = 1$  dan  $Re = 45$  untuk *Prandtl number* yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.4(a) dan 2.4(b). Seperti yang diharapkan, *Nusselt number*



meningkat seiring dengan meningkatnya nilai *Reynolds number* atau *Prandtl number*.



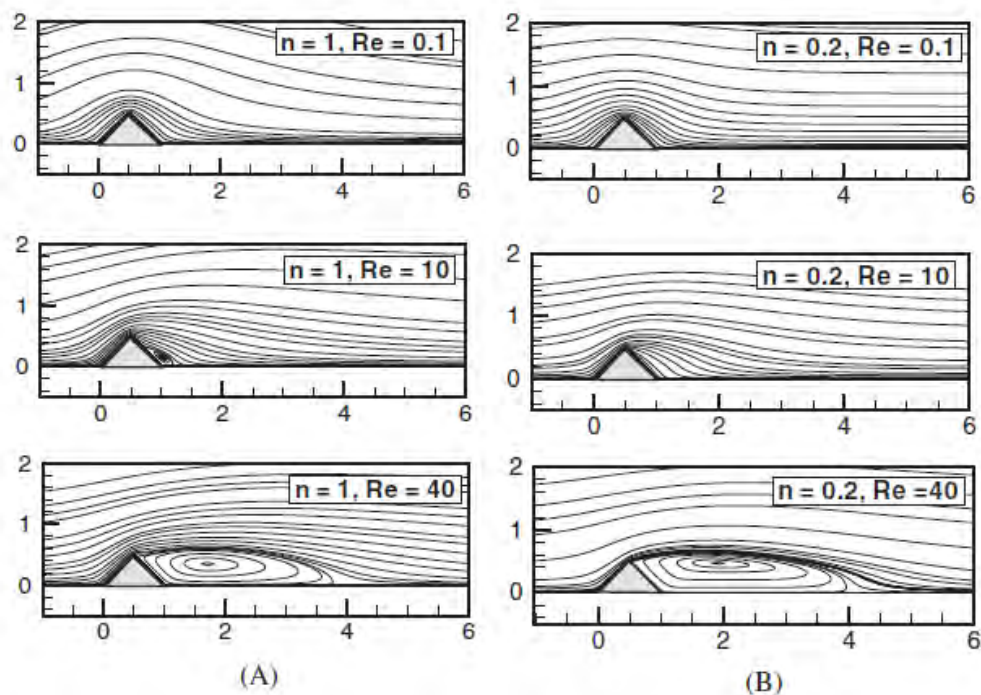
Gambar 2.4 *Local Nusselt number* sepanjang permukaan silinder untuk  $Re = 1$  dan  $Re = 45$  pada *Prandtl number* yang berbeda untuk (a, b) pada temperatur konstan dan (c, d) pada *heat flux* konstan

Hal ini terlihat bahwa setiap sudut *squaresilinder* menunjukkan nilai-nilai yang tinggi dari *Nusselt number* karena gradien suhu yang besar di permukaan *obstacle*. Lokal *Nusselt number* di setiap sudut silinder meningkat dengan peningkatan *Reynolds number* dan *Prandtl number*. Plot ini juga menunjukkan bahwa lokal *Nusselt number* meningkat ke sudut di *face* depan silinder persegi.

Untuk *face* atas silinder, terdapat peningkatan *Nusselt number* minimum karena adanya *isotherm* dekat tepi *trailingedgesilinder*. Untuk permukaan belakang silinder, ada minimum lokal di  $Re = 1$  sebagai *isotherm* yang mendekati sumbu

simetri dan di  $Re = 45$  dekat sudut *obstacle*. Variasi lokal *Nusselt number* untuk bagian atas silinder persegi di sepanjang permukaan silinder untuk kasus fluks panas konstan pada  $Re = 1$  dan di  $Re = 45$  untuk *Prandtl number* yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 2.4(c) dan 2.4(d). Plot ini mengungkapkan fitur kualitatif serupa seperti yang terlihat di atas untuk kasus kondisi batas suhu konstan.

Hasilnya, Von Karman *shedding vortices* mengakibatkan gerakan olakan pada daerah *isotherm* saat meregang dan menipis. Hal ini menyebabkan perubahan besar dalam bentuk *isotherm* bahkan waktu rata-rata di region sirkulasi dibandingkan dengan kasus aliran *steady* dan mekanisme transfer panas dari belakang silinder berbeda secara signifikan dalam dua jenis aliran. *Nusselt number* meningkat seiring peningkatan *Reynolds number*. Untuk kedua temperatur konstan dan *heat flux* konstan, *Nusselt number* tertinggi terletak pada permukaan *square* silinder depan, pada permukaan atas dan bawah *Nusselt number* tidak tinggi melainkan nilai tengah, dan *Nusselt number* terendah adalah pada permukaan belakang.



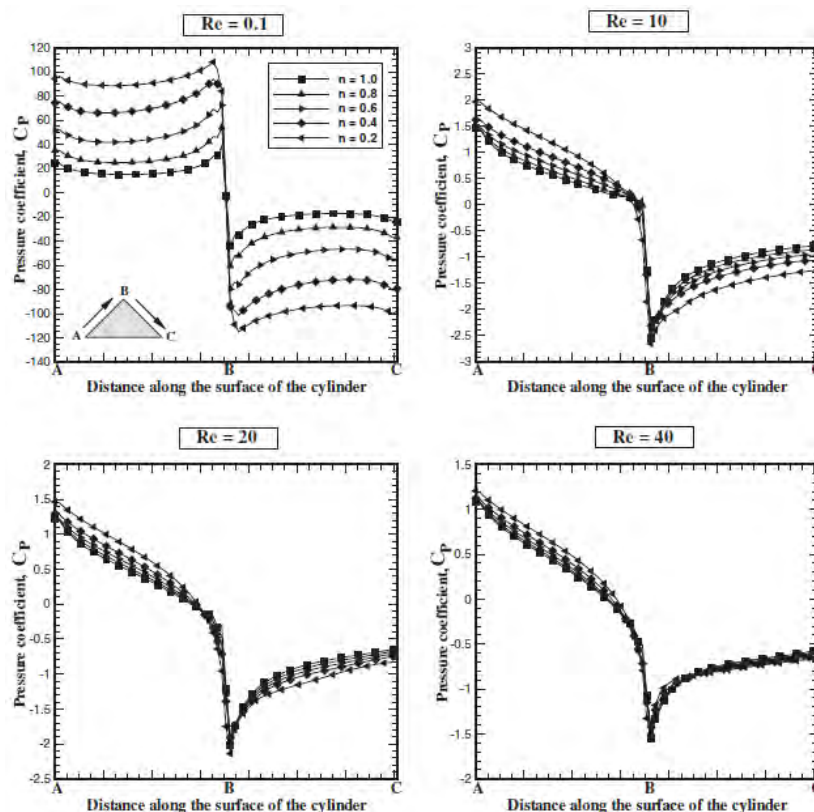
Gambar 2.5 Representatif profil *streamlines* pada  $Re = 0.1, 10$  dan  $40$  untuk (A) untuk  $n = 1.0$  (B) untuk  $n = 0.2$  [9]





Rao *et al* [9] melakukan studi numerik untuk meneliti sebuah fenomena *power-law Newtonian fluids* pada *heated square cylinder* yang diputar sejauh  $45^\circ$  menggunakan pendekatan secara dua dimensi (2-D) dan aliran *steady*. Penelitian menggunakan *range Re* antara 0.1 sampai dengan 40;  $0.7 \leq Pr \leq 100$ ; dan  $0.2 \leq n \leq 1$ . Tujuan dari penelitian Rao adalah ingin menjelaskan pengaruh *shear-thinning viscosity* antara *microscopic* dan *macroscopic* di dalam aliran yang melintas *square cylinder* dengan sudut  $45^\circ$ .

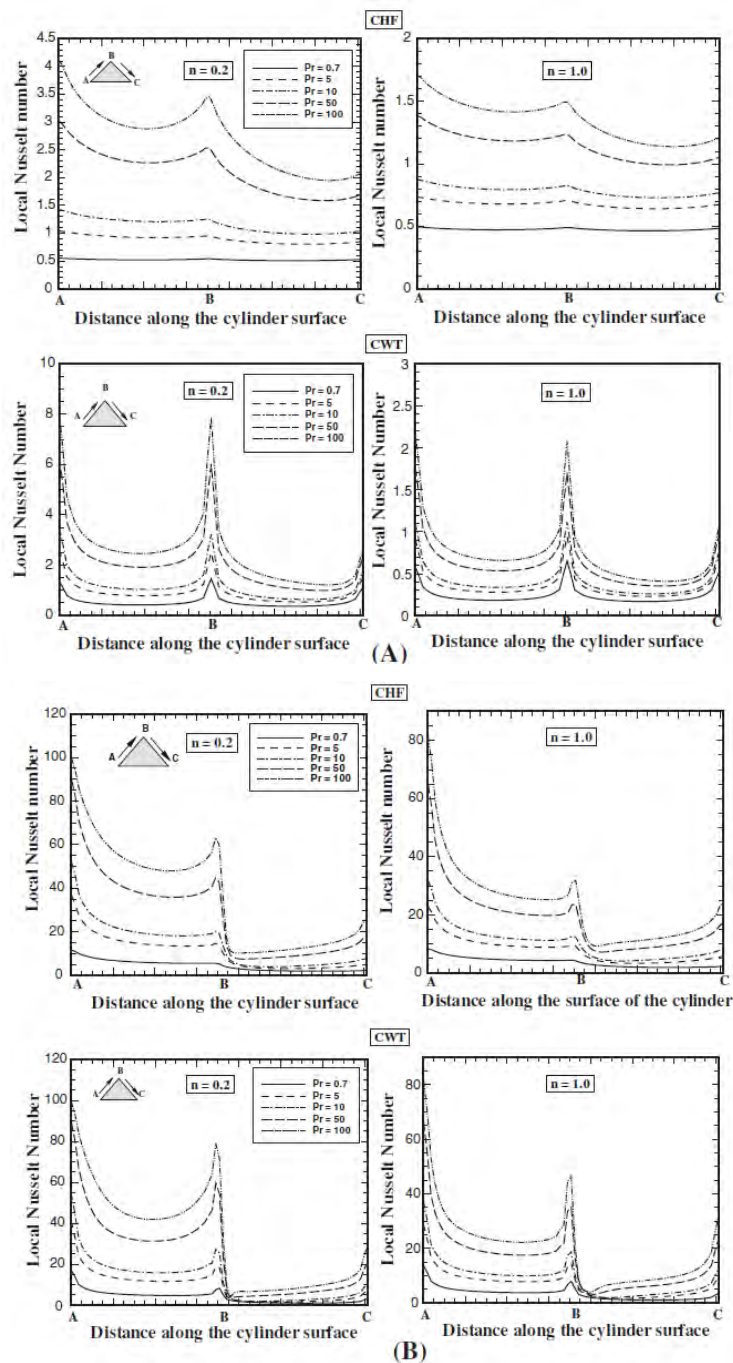
Data simulasi dapat digunakan untuk menghitung korelasi perpindahan panas yang diperoleh (dalam hal ini *Nusselt number*) sebagai fungsi dari *governing parameter* untuk memprediksi perpindahan panas antara cairan dan *immerse cylinder*, karakteristik dan distribusi tekanan serta nilai koefisien *drag*, vektor kecepatan, pola medan aliran (*streamlines*), dan propertis dari model aliran. Fenomena *twin vortex* terjadi pada  $Re = 10$  untuk semua *index power law* ( $n$ ).



Gambar 2.6 Variasi koefisien tekanan,  $C_p$  dengan *Reynolds number* dan *power-law index* [9]



Gambar 2.7 merepresentasikan nilai koefisien tekanan ( $C_p$ ) yang meningkat secara bertahap seiring dengan meningkatnya perilaku *shear*. Nilai *Reynolds number* yang meningkat berkorelasi dengan inersia fluida yang meningkat sehingga mengarah terjadinya apa yang disebut *Adverse Pressure Gradient* di belakang *bluff body*.



Gambar 2.7 Variasi local *Nusselt number* dengan *Prandtl number*, (A) pada  $Re = 0.1$ , (B) pada  $Re = 40$  [9]



Distribusi *local Nusselt number* pada *bluff body* ditunjukkan pada gambar 2.7 dimana untuk kedua kondisi batas termal yaitu, CWT (*constant wall temperature*) dan CHF (*constant heat flux*) nilai *local Nusselt number* sepanjang permukaan silinder untuk  $n = 0.2$  dan  $1,0$  serta  $Pr = 0.7; 5; 10; 50; \text{ dan } 100$  di  $Re = 40$  menunjukkan nilai yang maksimal pada titik A (stagnasi depan) kemudian mengalami penurunan yang bertahap sepanjang permukaan.

Pada *Reynolds number* rendah seperti gambar 2.7A *Nusselt number* sedikit bervariasi. Hal ini dipengaruhi oleh *Peclet number* karena faktor  $Pe = Re, Pr$ . Pada  $Re = 0.1$  gambar 7A, *Peclet number* meningkat seiring dengan peningkatan *Prandtl number* dalam *local Nusselt number*. Hal ini disebabkan karena penipisan lapisan batas termal yang menurunkan resistansi terhadap konduksi di dekat permukaan.



## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

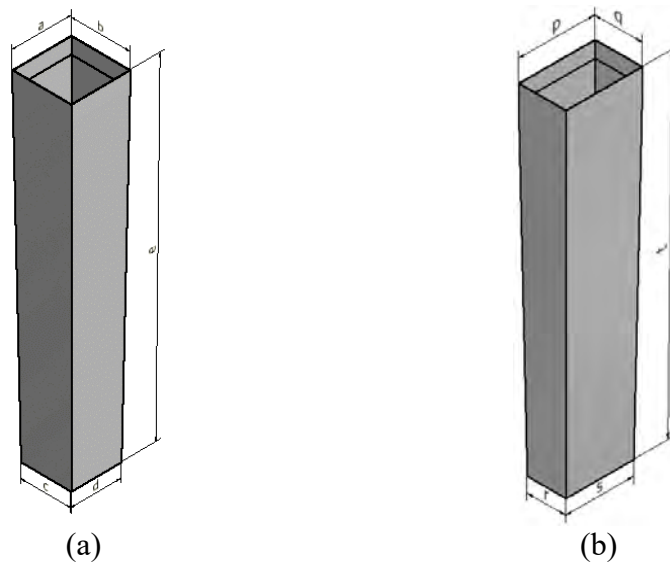
Penelitian ini dilakukan dengan kajian numerik menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics (CFD)* komersial untuk menjelaskan visualisasi karakteristik aliran dan perpindahan panas pada cetakan es balok (*ice can*) dengan bentuk *square cylinder* dan *rectangular cylinder* yang tersusun secara *inlined*. Simulasi dilakukan agar dapat memberikan informasi mengenai fenomena yang terjadi pada daerah sekitar dinding dengan adanya *brine* yang mengalir secara *crossflow* pada kondisi batas *temperature* konstan.

#### 3.1 Geometri Model Dan *Computational Domain*

Tahapan ini merupakan Tahapan awal dalam melakukan proses analisa dengan menggunakan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yaitu pemodelan atau membuat geometri, *meshing* atau pemberian *grid* sesuai dengan tingkat akurasi yang diinginkan dan penentuan domain/kondisi batas yang tepat di setiap batas geometri.

##### ▪ Geometri model cetakan es batu (*ice can*)

Geometri cetakan es balok (*ice can*) dibuat berbeda dengan kondisi sebenarnya pada pabrik es untuk mempermudah simulasi. Geometri *square* sebenarnya mempunyai spesifikasi bentuk persegi bagian atas dengan panjang sisi-sisinya 190 mm, bentuk persegi bagian bawah dengan panjang sisi-sisinya 160 mm, sedangkan untuk bentuk *rectangular* mempunyai spesifikasi bentuk persegi panjang dengan ukuran panjang x lebar masing-masing 240 x 150 mm dan pada bagian bawah mempunyai ukuran 210 x 120 mm. Tinggi dari kedua bentuk cetakan sama yaitu 1115 mm. Geometri *ice can* pada simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 (a) untuk bentuk penampang *square* dan (b) untuk bentuk penampang *rectangular* dengan spesifikasi ukuran pada Tabel 3.1. Simulasi dilakukan menggunakan 6 buah cetakan *ice can* yang disusun secara *inlined*.



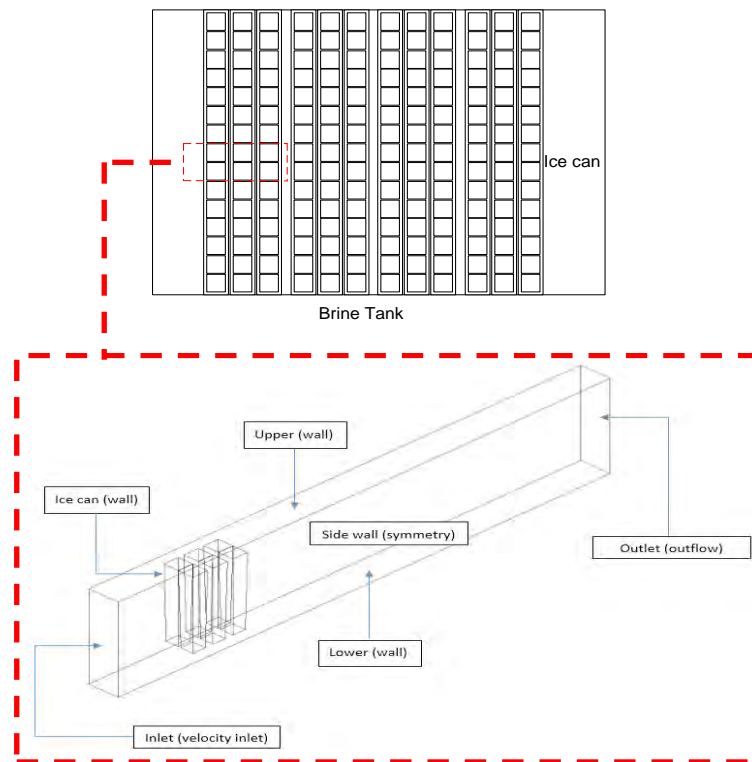
Gambar 3.1 Geometri cetakan es balok dengan pandangan *isometri* (a) Bentuk penampang *square* dan (b) Bentuk penampang *rectangular*

Tabel 3.1 Ukuran geometri *ice can* dan domain simulasi

Geometri	Ukuran (mm)
a	187
b	187
c	160
d	160
e	1060
p	237
q	147
r	120
s	210
t	1060

#### ▪ Domain pemodelan dan kondisi batas

Untuk melakukan simulasi aliran melintasi cetakan es balok (*ice can*) dilakukan pembuatan dimensi domain simulasi secara 3 dimensi pada kedua geometri. Domain simulasi diambil dari 6 buah *ice can* yang disimulasikan dengan menempatkan *ice can* tersebut pada sebuah *ducting* agar simulasi aliran melintasi *ice can* dapat dilakukan. Gambaran jelas domain simulasi dipaparkan pada Gambar 3.2 dengan menggunakan domain bentuk *square*.



Gambar 3.2 Domain dan kondisi batas pemodelan untuk geometri *square cylinder* secara 3 dimensi

Kondisi batas beserta nilai yang ditentukan di dalam penelitian ini seperti terpapaar dalam tabel 3.2.

Tabel 3.2 Penamaan dan nilai kondisi batas

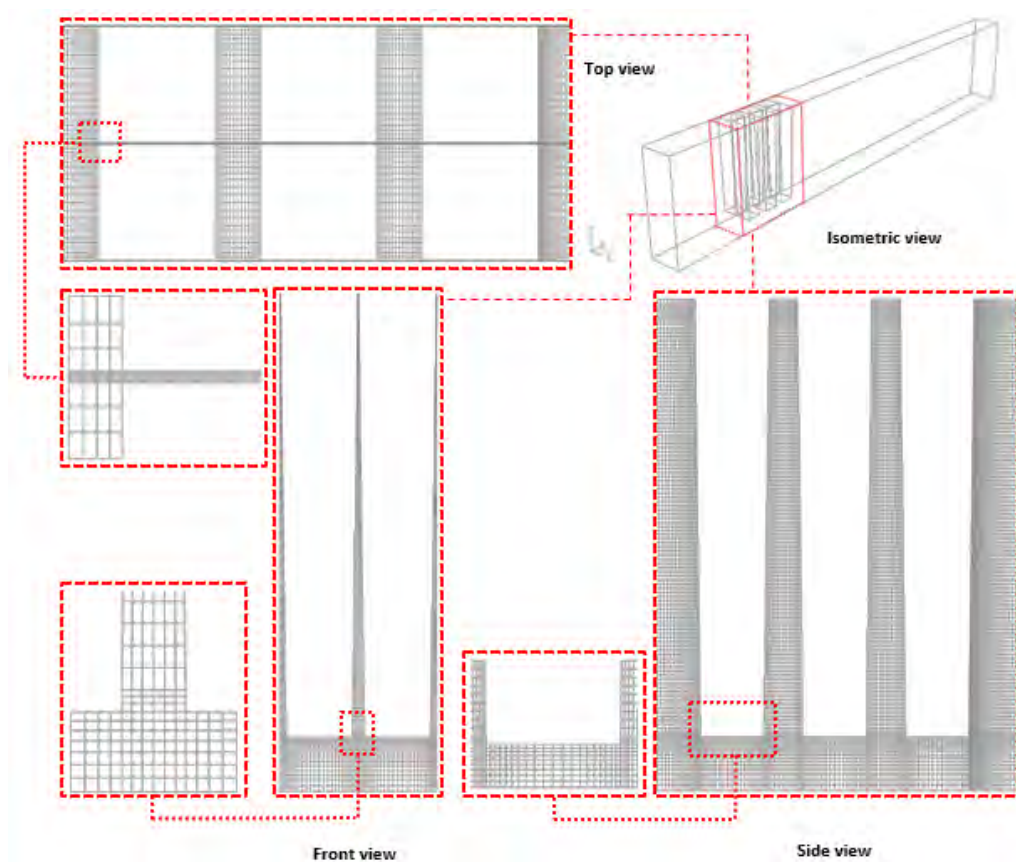
<i>Boundary condition</i>	<i>Value</i>
<b><i>Inlet</i></b>	Tipe = <i>Velocity inlet</i> $V_{in} = 0,05 \text{ m s}^{-1}$ $T_{in} = -8^{\circ}\text{C}$
<b><i>Outlet</i></b>	Tipe = <i>Outflow</i>
<b><i>Ice can</i></b>	Tipe = <i>Wall</i> Material aluminium <i>Temperature</i> = $0^{\circ}\text{C}$
<b><i>Top wall</i></b>	Tipe = <i>Wall (adiabatic)</i>
<b><i>Bottom wall</i></b>	Tipe = <i>Wall (adiabatic)</i>
<b><i>Sides wall</i></b>	<i>Symmetry</i>





### ▪ **Meshing**

Bidang atau volume yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*), sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *meshing* yang dipilih untuk permodelan 3 dimensi ini adalah *hexahedron map*. Gambar bentuk *meshing* akan dipaparkan pada Gambar 3.3 secara 2 dimensi dengan beberapa pandangan untuk memudahkan dalam penyajian gambar.



Gambar 3.3 *Meshing hexahedron map* dengan pandangan *top*, *front*, dan *side* untuk geometri *square cylinder*

### ▪ **Materials**

Tipe material *fluid* yang digunakan adalah *brine* dengan nama senyawa *ethyleneglycol* ( $C_2H_6O_2$ ). *Ethyleneglycol* berbeda dengan *water* ( $H_2O_{(l)}$ ) karena mempunyai titik beku yang lebih rendah sehingga digunakan sebagai fluida pendingin untuk membuat es balok. Pada Tabel 3.3 dipaparkan perbedaan propertis



antara *ethyleneglycol* dan *water* pada *temperature* kamar dan propertis *ethyleneglycol* pada *temperature* 265 K sesuai dengan kondisi simulasi. Tipe material *solid* yang digunakan adalah Aluminium (Al) *properties* konstan sesuai Tabel 3.4.

Tabel 3.3 Perbandingan propertis ( $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ ) dan *ethyleneglycol* ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ )

<i>Properties</i>	<i>Water</i> ( $\text{H}_2\text{O}_{(l)}$ ) @ 300 K	<i>Ethyleneglycol</i> ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) @ 300 K	<i>Ethyleneglycol</i> ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) @ 265 K
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	998,2	1111,4	1065,68
<i>Cp</i> (J/kg.K)	4182	2415	3510,27
<i>Thermal Conductivity</i> (W/m.K)	0,6	0,252	0,449
<i>Dynamic viscosity</i> (kg/m.s)	0,001003	0,0152	0,0906

Tabel 3.4 Propertis *Aluminium*(Al)

<i>Properties</i>	<i>Aluminium</i> (Al)
<i>Density</i> (kg/m <sup>3</sup> )	2719
<i>Cp</i> (J/kg.K)	871
<i>Thermal Conductivity</i> (W/m.K)	202,4

▪ **Solution**

Penentuan parameter kendali solusi (*solution controls*) dilakukan dengan *input* sebagai diperlihatkan pada tabel 3.5 sebagai berikut:

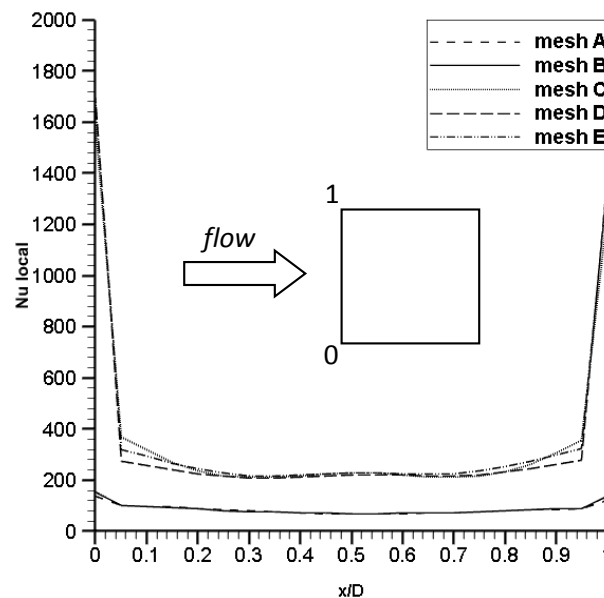
Tabel 3.5 Penentuan parameter kendali

Parameter kendali	Input
<i>Equations</i>	<i>flow dan energy</i>
<i>Pressure velocity coupling</i>	<i>SIMPLE</i>
<i>Under Relaxation Factors</i>	<i>default</i>
<i>Pressure</i>	<i>second order</i>
<i>Momentum dan energy</i>	<i>second order upwind</i>



### 3.2 Grid Independency

Pada penelitian numerik, grid independent test perlu dilakukan untuk mengetahui keakuratan dan kevalidasian dari hasil numerik. Grid independency adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan hasil simulasi dalam *software* yang tidak terpengaruh oleh ukuran *mesh* atau *grid*. Pada penelitian ini digunakan 5 macam model *mesh* dengan jumlah *cells*, *faces*, dan *nodes* masing-masing terpapar pada Tabel 3.6. Dari ke-lima macam *mesh* yang disimulasikan, dihitung perbedaan besarnya nilai *Nu* lokal *average* dari *mesh* A,B,C, dan E terhadap *mesh* D (*mesh* acuan). Dengan mengambil nilai *Nu* lokal pada permukaan *upstream cylinder* maka diperoleh grafik perbandingan *Nu* lokal dari setiap macam *mesh*.



Gambar 3.4 Grafik perbandingan *Nu* lokal pada permukaan *upstream cylinder* untuk ke-lima macam *mesh*

Tabel 3.6 *Grid independency*

Tipe <i>mesh/grid</i>	<i>Cells</i>	<i>Faces</i>	<i>Nodes</i>	<i>Nu</i> lokal avg	$\Delta$ <i>Error</i>
<i>Mesh A</i>	1028816	3151466	1093542	84.81	273.07
<i>Mesh B</i>	1118916	3426808	1188694	86.37	271.51
<i>Mesh C</i>	1256076	3841908	1329494	362.42	4.54
<i>Mesh D</i>	1365804	4173988	1442134	357.88	0
<i>Mesh E</i>	1449880	4432554	1532516	372.49	14.62

Ket: *Nu* lokal *average* diambil pada dinding *upstream can 1* dengan posisi  $y = 1$



Jika dilihat grafik pada Gambar 3.4 maka *mesh* C mempunyai nilai yang hampir berhimpit dengan *mesh* D (*mesh* acuan). Pada Tabel 3.6 juga dapat dibandingkan besar nilai *Nu* lokal *average* yang tidak jauh berbeda dengan *mesh* tipe D dengan  $\Delta Error$  terkecil yaitu 4,54 dan jumlah *cells* yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan *mesh* tipe E dengan  $\Delta Error$  14,62 tetapi mempunyai jumlah *cells* yang lebih banyak. Jadi dari ke-lima macam *mesh* pada grafik Gambar 3.4 dan data pada Tabel 3.6 maka dipilih *mesh* tipe C untuk dijadikan acuan pada simulasi selanjutnya karena mempunyai  $\Delta Error$  dan jumlah *cells* terkecil terhadap *mesh* D yang dijadikan sebagai *mesh* acuan.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*



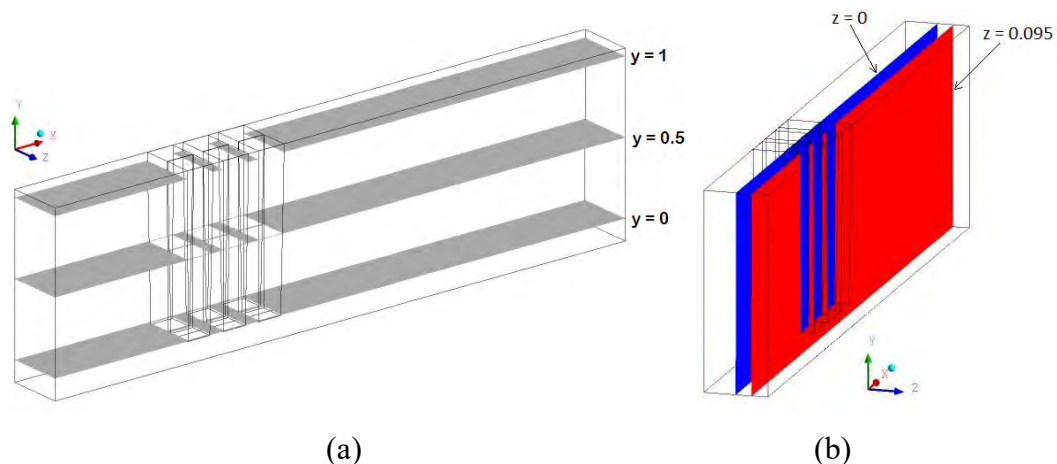
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan hasil dari solusi pemodelan aliran *brine* yang melintasi cetakan es balok (*ice can*) dengan bentuk penampang bujursangkar (*square*) dan bentuk penampang persegi panjang (*rectangular*) untuk mengetahui karakteristik aliran fluida dan perpindahan panas pada kondisi *steady*. Simulasi dilakukan pada 6 buah cetakan es balok yang tersusun secara inlined secara 3 dimensi menggunakan software CFD komersial untuk masing-masing bentuk cetakan. Visualisasi aliran dan perpindahan panas ditampilkan secara 2 dimensi untuk memudahkan analisa data. Data kualitatif berupa kontur kecepatan, kontur temperatur, kontur tekanan, vektor kecepatan dan *streamlines*. Sedangkan data kuantitatif berupa *Nusselt number* (Nu) lokal dan profil kecepatan.

#### 4.1 Posisi Dan Cara Pengambilan Data

*Post processing* untuk pengambilan data dengan pandangan *top view* dilakukan pada *XZ-plane* untuk setiap posisi  $y = 1$  (bagian atas);  $y = 0,5$  (bagian tengah); dan  $y = 0$  (bagian bawah). Sedangkan untuk pengambilan data dengan pandangan *side view* dilakukan pada *XY-plane* untuk setiap posisi  $z = 0$  (bagian celah antar *can*); dan  $z = 0,095$  (bagian tengah yang memotong *can*). Posisi pengambilan data ditunjukkan seperti pada Gambar 4.1 (a) dan (b).



Gambar 4.1 Posisi pengambilan data pada (a) *XZ-plane* dengan posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ;  $y = 0$  dan (b) *XY-plane* dengan posisi  $z = 0$ ;  $z = 0,095$

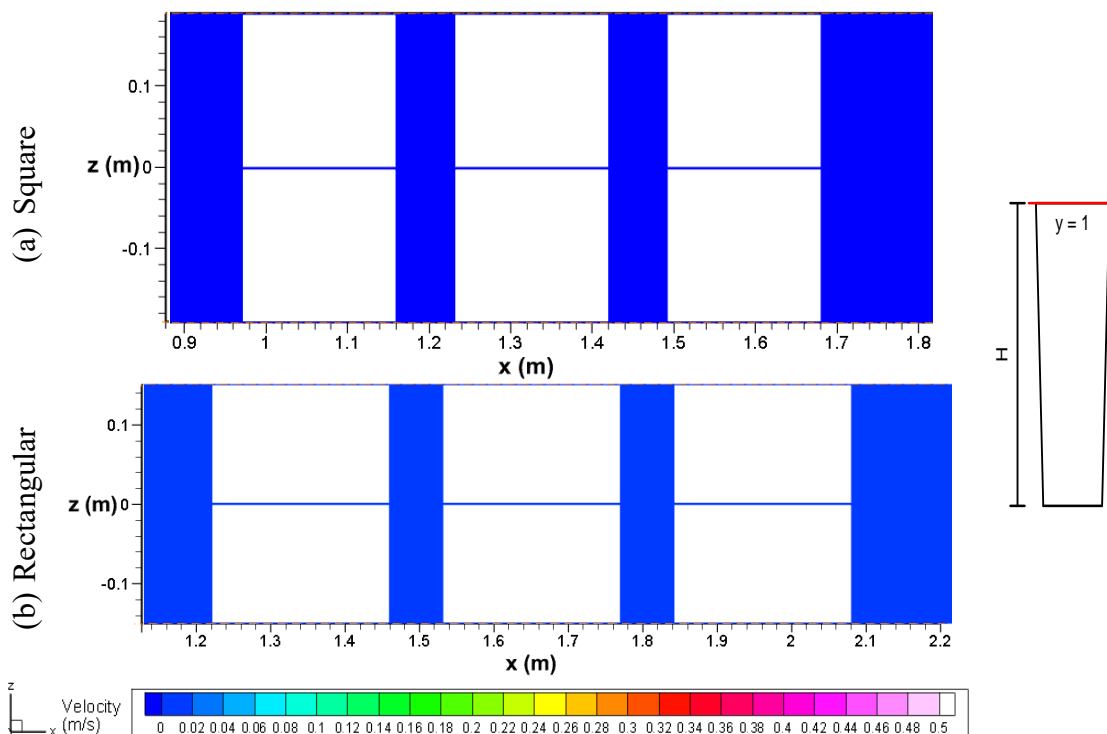


## 4.2 Karakteristik Aliran Pada Cetakan Es Balok (*Ice Can*)

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai karakteristik aliran yang terjadi pada *brine* yang berinteraksi dengan dinding cetakan es balok (*ice can*) yang mempunyai bentuk dan ukuran seperti prisma dengan dimensi bagian atas lebih besar daripada bagian bawah dengan bentuk penampang bujursangkar (*square*) dan bentuk penampang persegi panjang (*rectangular*).

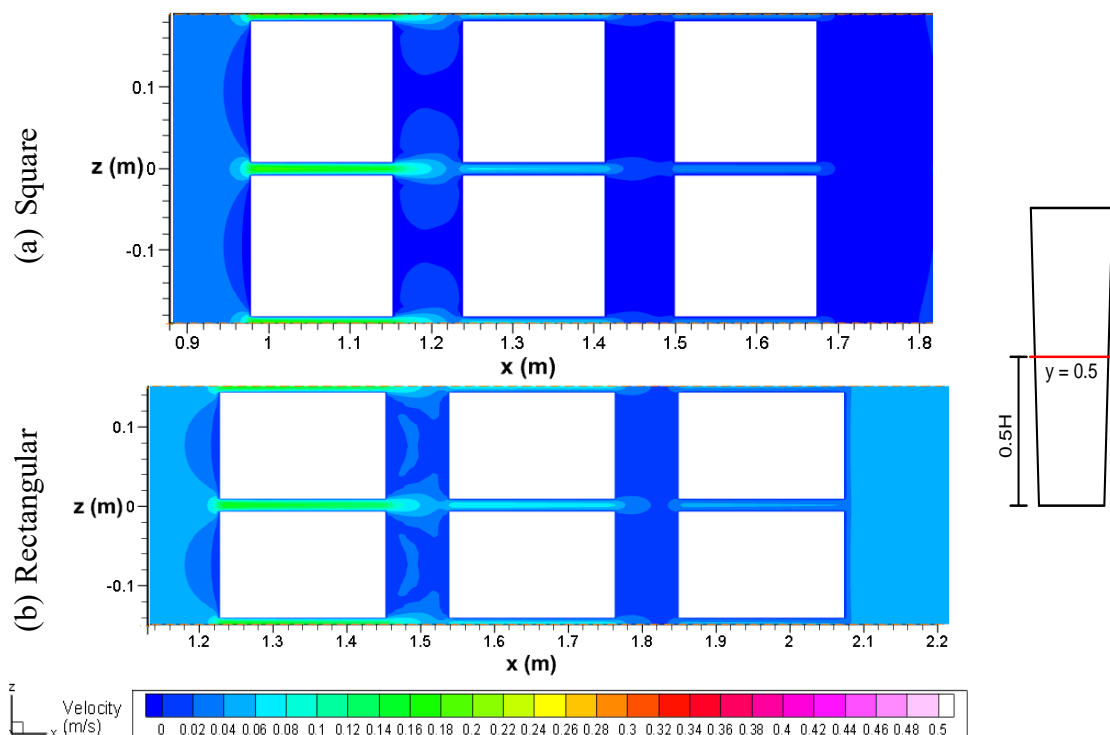
### 4.2.1 Analisa Fenomena Fisis Dan Karakteristik Aliran Melintasi Cetakan Es Balok Pada *XZ-Plane*

Fenomena dan karakteristik aliran pada geometri *square* dan *rectangular* yang akan diuraikan pada bagian ini diawali dengan melakukan interpretasi pada data kualitatif berupa visualisasi aliran *brine* (kontur kecepatan, vektor kecepatan, dan *streamlines*) untuk posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ; dan  $y = 0$  pada pandangan tampak atas (*XZ-plane*) dan selanjutnya ditampilkan data kuantitatif berupa profil kecepatan untuk memperkuat penjelasan fenomena data kualitatif tersebut.



Gambar 4.2 Kontur kecepatan tampak atas (*XZ-plane*) dengan posisi  $y = 1$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*

Kontur kecepatan aliran *brine* dengan kondisi *temperature* dinding konstan pada posisi  $y = 1$  ditunjukkan pada Gambar 4.2 (a) untuk penampang *square* dan Gambar 4.2 (b) untuk penampang *rectangular*. Dari visualisasi kontur yang terbentuk untuk kedua geometri cetakan mempunyai kemiripan yaitu mempunyai kecepatan yang rendah pada daerah di sekitar *can* dengan posisi  $y = 1$ . Hal ini terjadi dikarenakan bentuk penampang cetakan bagian atas lebih besar jika dibandingkan dengan bagian lain sehingga berpotensi memperlambat aliran *brine* di sekitarnya.



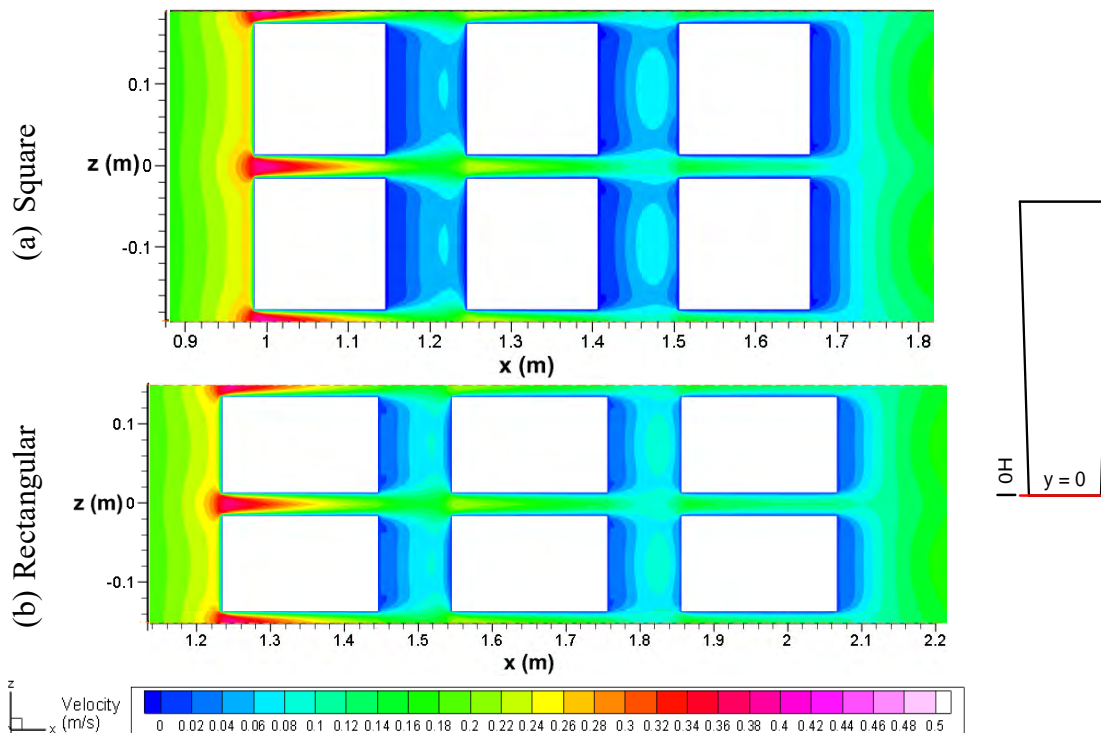
Gambar 4.3 Kontur kecepatan tampak atas (*XZ-plane*) dengan posisi  $y = 0,5$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*

Visualisasi kontur kecepatan aliran *brine* dengan kondisi *temperature* dinding konstan pada posisi  $y = 0,5$  dapat dilihat pada Gambar 4.3 (a) untuk penampang *square*. Berdasarkan kontur tersebut terlihat bahwa kecepatan aliran sebelum menumbuk baris *can* ke-1 dengan kecepatan yang tinggi ditandai dengan warna biru muda. Kecepatan yang berasal dari *inlet* menuju baris *can* ke-3 semakin ke belakang semakin berkurang hingga pada sisi ujung baris *can* ke-3 mempunyai





kecepatan mendekati 0 m/s. Penurunan kecepatan ini disebabkan oleh lebarnya geometri *can* pada posisi bagian atas ( $y=1$ ) sehingga menyebabkan perlambatan aliran. Sedangkan untuk geometri *rectangular* (Gambar 4.3 b), kontur kecepatan memiliki konfigurasi yang hampir sama dengan geometri *square*. Pada sisi *inlet* kecepatan mengalami peningkatan ketika melewati celah yang sempit, kemudian kecepatan mulai menurun sampai pada sisi ujung baris *can* ke-3. Daerah di belakang baris *can* ke-3 mempunyai kecepatan minimum. Namun, berbeda dengan geometri *square*, pada daerah paling ujung dari baris *can* ke-3 kecepatan mengalami peningkatan meskipun tidak terlalu signifikan yang disebabkan adanya perbedaan geometri dan lebar penampang dari geometri *rectangular* yang lebih pipih dibandingkan geometri *square*.

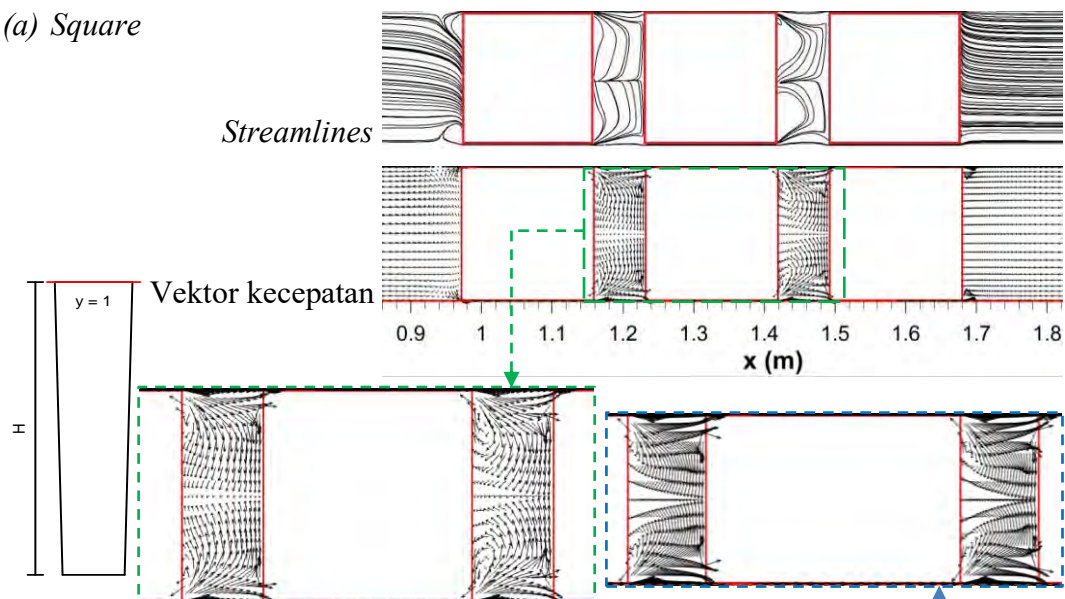


Gambar 4.4 Kontur kecepatan tampak atas ( $XZ$ -plane) dengan posisi  $y = 0$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*

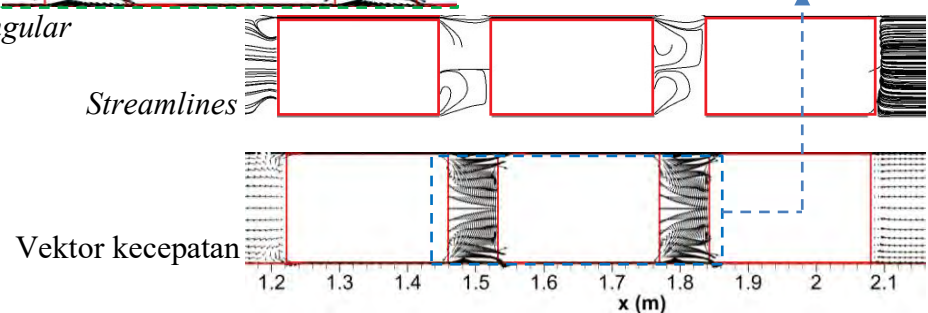
Fenomena menarik ketika aliran menumbuk geometri *square* pada  $y = 0$  (Gambar 4.4 a), kecepatan terbesar terjadi pada ujung celah sebelum baris *can* ke-1 kemudian memasuki celah antara baris *can* ke-1 aliran mengalami *flow*

*accelerated* di bagian tengah celah sesaat ditandai dengan warna merah dan kemudian mengalami penurunan saat keluar celah *can* baris ke-1. Peningkatan dan penurunan kecepatan juga terjadi saat melewati baris *can* ke-2 dan ke-3 dengan nilai yang semakin rendah. Pada daerah di belakang *can* baris ke-3 kecepatan pada daerah keluar celah lebih tinggi dari kecepatan tepat di belakang dinding *can*. Kecepatan mengalami peningkatan setelah melewati *can* baris ke-3 karena aliran dari sisi samping *can* bertemu kembali tanpa adanya halangan. Pada geometri *rectangular* (Gambar 4.4 b) tidak mengalami perbedaan yang signifikan dengan geometri *square*, perbedaan hanya terletak pada celah antara *can* baris ke-1 dan baris ke-2 dan celah antar *can* baris ke-2 dan baris ke-3. Pada celah di geometri *rectangular* ini terlihat mempunyai kecepatan yang lebih tinggi karena area penampangnya lebih kecil/pipih jika dibandingkan dengan geometri *square*.

(a) *Square*



(b) *Rectangular*



Gambar 4.5 *Streamlines* dan vektor kecepatan tampak atas (*XZ-plane*) pada (a) Geometri *square* dan (b) Geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 1$

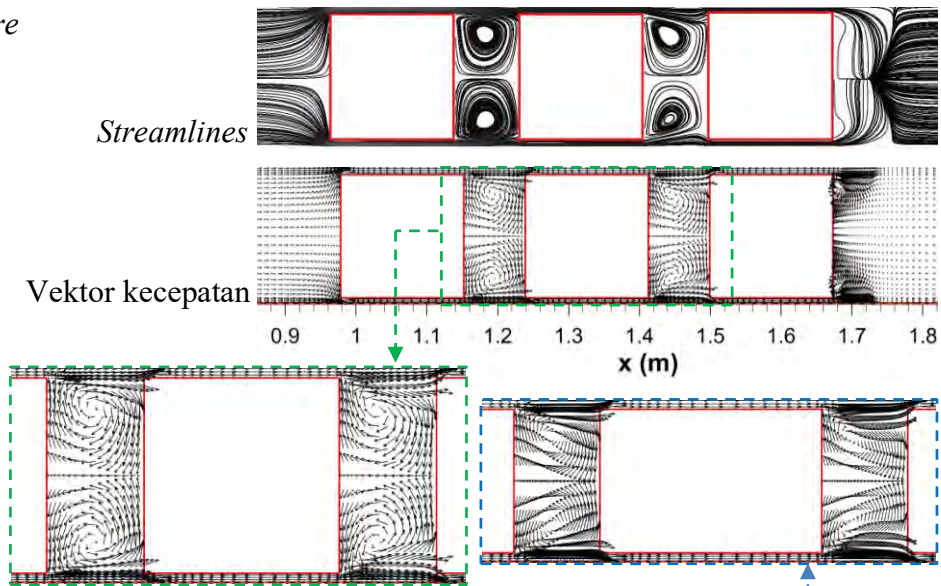


Visualisasi *streamlines velocity* dan *vector velocity* ditampilkan pada Gambar 4.5 untuk geometri *square* dan geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 1$ . Vektor kecepatan ditampilkan dengan skala yang seragam dengan tujuan untuk mengetahui arah pergerakan fluida di sekitar *ice can*. Pada geometri *square* (Gambar 4.5 a) vektor kecepatan di belakang *can* 1 dan *can* 2 seragam serta mempunyai arah ke bagian dalam tapi tidak terjadi pusaran (*vortex*). Hal ini terjadi karena tidak adanya *shear flow* yang kuat dari aliran di bagian celah antar *can* dan karena pengaruh dari gesekan dinding bagian atas pada domain komputasi. Visualisasi ini sesuai dengan bentuk *streamlines* yang ada yaitu tidak membentuk pusaran di belakang *can* 1 dan *can* 2 tapi hanya muncul lapisan-lapisan masuk ke arah bagian dalam.

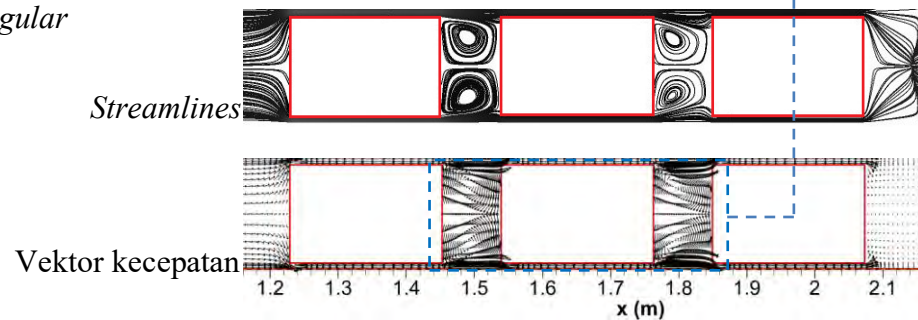
Pada geometri *rectangular* (Gambar 4.5 b) vektor kecepatan di belakang *can* 1 dan *can* 2 mempunyai bentuk yang tidak seragam dengan arah aliran ke bagian dalam dengan ukuran vektor kecepatan di depan *can* baris ke-2 lebih panjang yang mengindikasikan bahwa aliran di depan *can* baris ke-2 lebih tinggi. Pada daerah di belakang *can* baris ke-2 juga terjadi sama seperti pada fenomena pada daerah di belakang *can* baris ke-1. Visualisasi ini sesuai dengan bentuk *streamlines* yang ada yaitu terbentuk lapisan yang mempunyai arah ke bagian dalam pada daerah di depan *can* baris ke-2 dan baris ke-3.

Visualisasi *streamlines velocity* dan *vector velocity* ditampilkan pada Gambar 4.6 untuk geometri *square* dan geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 0,5$ . Pada geometri *square* (Gambar 4.6 a) vektor kecepatan di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 membentuk *secondary flow* berupa pusaran (*vortex*) dari kedua sisi. Hal ini terjadi karena adanya *shear flow* yang kuat dari aliran di bagian celah antar *can* karena celah pada posisi ini lebih lebar jika dibandingkan dengan celah pada posisi  $y = 1$ . Visualisasi didukung oleh bentuk *streamlines* yang sesuai membentuk lapisan pusaran di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2. Adanya *vortex* ini akan semakin meningkatkan turbulensi di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 sehingga perpindahan panas yang terjadi juga akan semakin meningkat.

(a) *Square*



(b) *Rectangular*



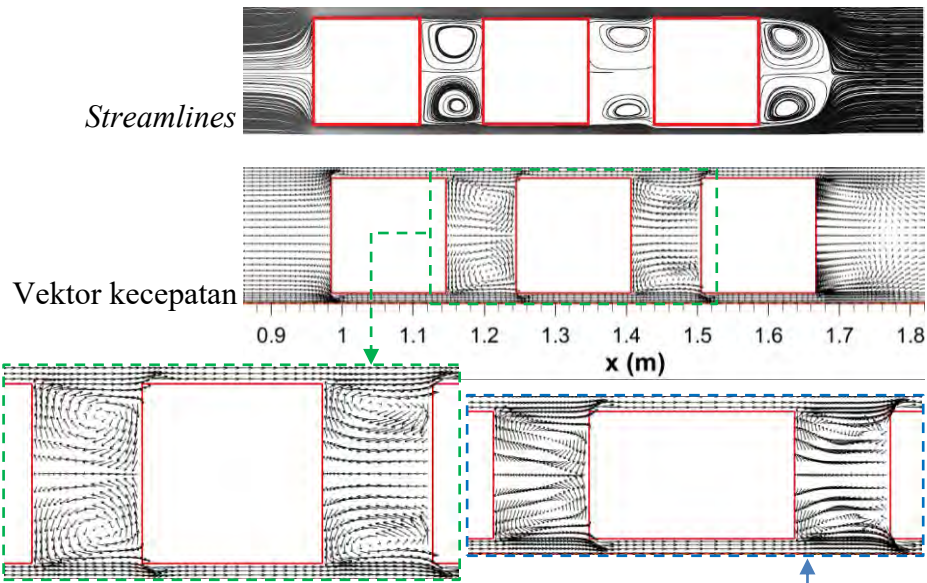
Gambar 4.6 *Streamlines* dan vektor kecepatan tampak atas (*XZ-plane*) pada (a) Geometri *square* dan (b) Geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 0,5$

Pada geometri *rectangular* (Gambar 4.6 b) vektor kecepatan di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 mempunyai arah yang berbeda dengan bentuk *square* yaitu ada yang arah masuk dan ada arah aliran yang keluar atau saling berlawanan antara permukaan sisi belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 sehingga tidak terbentuk aliran berputar seperti *vortex*. Hal yang sama juga terjadi pada daerah belakang *can* baris ke-2 akan tetapi mempunyai panjang vektor yang lebih pendek. Visualisasi didukung dengan bentuk *streamlines* yang ada yaitu tidak membentuk pusaran penuh di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 tapi lebih berbentuk meruncing mengarah ke bagian belakang *can* baris ke-1.

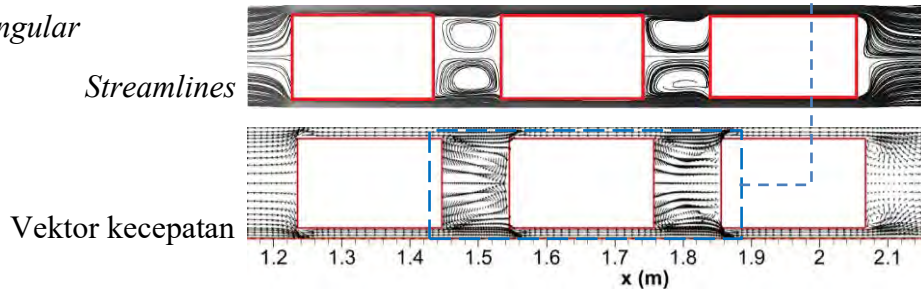




(a) *Square*



(b) *Rectangular*



Gambar 4.7 *Streamlines* dan vektor kecepatan tampak atas (*XZ-plane*) pada (a) Geometri *square* dan (b) Geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 0$

Gambar 4.7 menampilkan visualisasi *streamlines velocity* dan *vector velocity* untuk geometri *square* dan geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 0$ . Pada geometri *square* (Gambar 4.7 a) vektor kecepatan di belakang *can* baris ke-1 membentuk *secondary flow* berupa pusaran aliran (*vortex*) yang bentuknya mirip dengan kondisi pada posisi  $y = 0,5$  hanya panjang vektornya lebih pendek. *Secondary flow* muncul karena adanya *shear flow* dari aliran yang berada di celah antar *can* yang mempunyai kecepatan lebih tinggi. Pada posisi di belakang *can* baris ke-2 *secondary flow* berupa pusaran aliran (*vortex*) juga muncul hanya bentuknya lebih pipih karena kecepatan aliran di celah antar *can* pada baris ke-2 sudah mengalami penurunan. *Vortex* ini akan meningkatkan perpindahan panas yang terjadi di sekitarnya.

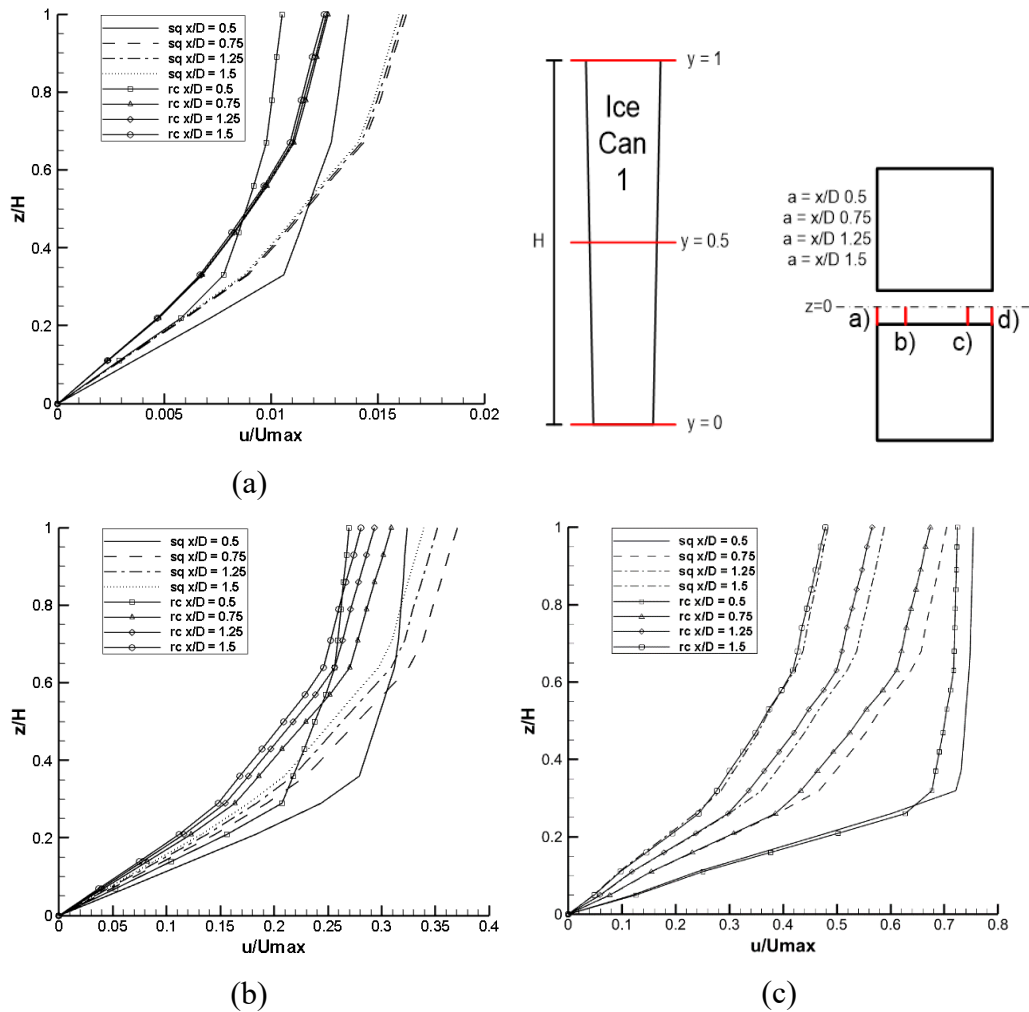


Pada geometri *rectangular* (Gambar 4.7 b) vektor kecepatan di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 mempunyai bentuk yang hampir sama dengan posisi saat  $y = 0,5$ . Vektor kecepatan mempunyai arah yang berbeda dengan bentuk *square* yaitu ada yang arah masuk dan ada arah aliran yang keluar atau saling berlawanan antara permukaan sisi belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 sehingga tidak terbentuk aliran berputar seperti *vortex*. Berbeda dengan posisi  $y = 0,5$  panjang vektor yang lebih pendek berada pada permukaan depan *can* baris ke-2 dan *can* baris ke-3. Visualisasi didukung dengan bentuk *streamlines* yang ada yaitu tidak membentuk pusaran penuh di belakang *can* baris ke-1 dan *can* baris ke-2 tapi lebih berbentuk lebih pipih jika dibandingkan dengan geometri *square* dan lapisan yang terbentuk juga lebih renggang.

#### 4.2.2 Profil Kecepatan Pada Celah Antar *Ice Can* di *XZ-Plane*

Profil kecepatan yang terjadi di celah antar *ice can* akan diuraikan pada sub bab ini. Profil kecepatan yang terbentuk pada setiap celah *ice can* belum menjadi bentuk *fully developed* karena pendeknya geometri setiap *ice can*. Pada Gambar 4.8 ditampilkan bentuk profil kecepatan yang terjadi di celah antar *ice can* pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0.5$ ; dan  $y = 0$  untuk geometri *square* dan *rectangular*. Profil kecepatan menggunakan bilangan tak berdimensi dengan sumbu-x merupakan fungsi kecepatan aliran  $u/U_{\max}$  dan sumbu-y merupakan fungsi lebar celah  $z/H$ . Profil kecepatan yang terbentuk untuk celah ke -1, ke-2, dan ke-3 mempunyai tren yang sama sehingga ditampilkan untuk celah ke-1 pada *ice can* 1 saja.

Bentuk profil kecepatan yang terjadi di celah antar *ice can* terdepan (antar *ice can* 1 dan *ice can* 4) pada berbagai posisi ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada posisi  $y = 1$  kecepatan yang terjadi pada geometri *square* lebih tinggi jika dibandingkan dengan geometri *rectangular* untuk setiap posisi  $x/D$  yang sama. Kecepatan pada posisi  $z/H$  tertinggi diperoleh dengan nilai  $u/U_{\max}$  pada angka 0.016 pada geometri *square* dan terendah dengan nilai  $u/U_{\max}$  pada angka 0.012 pada geometri *rectangular*.

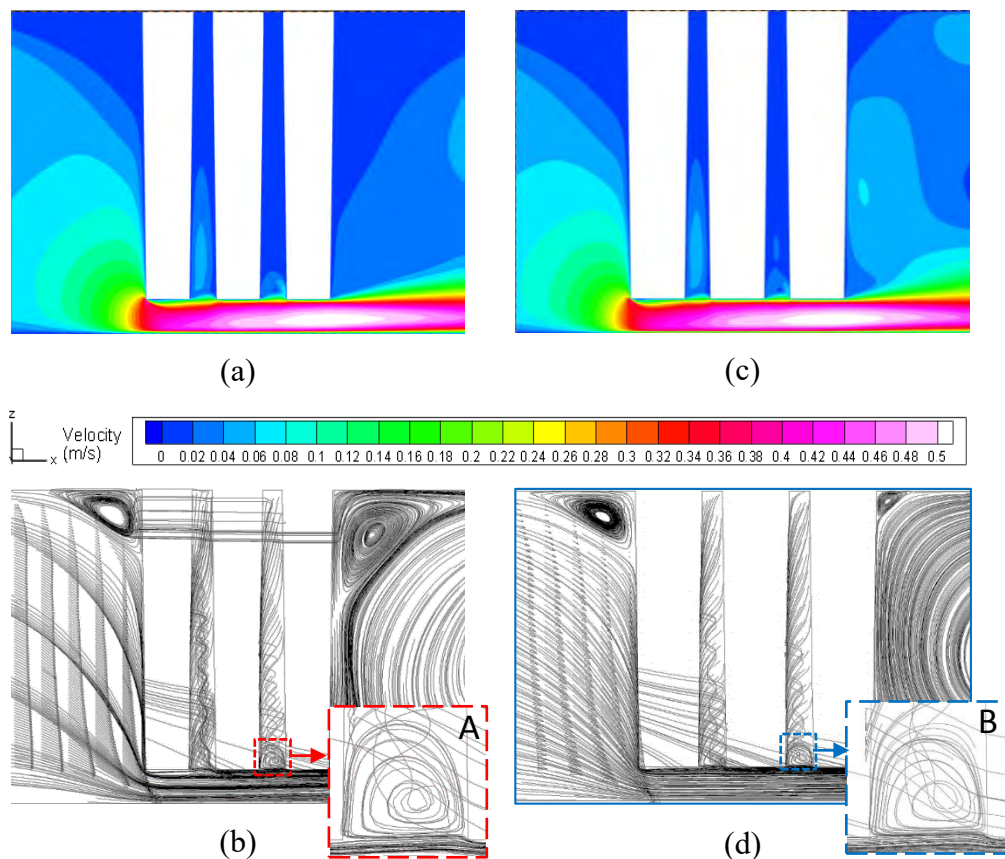


Gambar 4.8 Profil kecepatan di celah antar *ice can* tampak atas ( $XZ$ -plane) pada *ice can* 1 untuk geometri *square* dan geometri *rectangular* dengan posisi (a)  $y = 1$ , (b)  $y = 0.5$ , dan (c)  $y = 0$

Kecepatan pada geometri *square* lebih tinggi dikarenakan pada celah antar *ice can* baris ke-1 mempunyai *pressure drop* -59.9 Pa yang nilainya lebih tinggi jika dibandingkan dengan *pressure drop* pada geometri *rectangular* sebesar -36.98 Pa. Tingginya *pressure drop* yang terjadi ini akan menyebabkan naiknya kecepatan aliran di celah antar *ice can* pada geometri *square*. Profil yang sama terjadi pada posisi  $y = 0.5$  dan  $y = 0$  yaitu *pressure drop* pada geometri *square* lebih besar yaitu berturut-turut -145.03 Pa dan 183.8 Pa sedangkan *pressure drop* pada geometri *rectangular* berturut-turut -140.12 Pa dan -116.1 Pa.

#### 4.2.3 Analisa Fenomena Fisis Dan Karakteristik Aliran Melintasi Cetakan Es Balok Pada $XY$ -Plane

Fenomena dan karakteristik aliran pada geometri *square* dan *rectangular* yang akan diuraikan pada bagian ini diawali dengan melakukan interpretasi pada data kualitatif berupa visualisasi aliran *brine* (kontur kecepatan, vektor kecepatan dengan *pathline*) untuk posisi  $z = 0$ ; dan  $z = 0,095$  pada pandangan tampak samping ( $XY$ -plane) dan selanjutnya ditampilkan data kuantitatif berupa distribusi kecepatan untuk memperkuat penjelasan fenomena data kualitatif tersebut.



Gambar 4.9 (a) Kontur kecepatan pada geometri *square* pada posisi  $z = 0,095$  dan (b) *pathline* dengan vektor kecepatan serta (c) Kontur kecepatan pada geometri *rectangular* pada posisi  $z = 0,075$  dan (d) *pathline* dengan vektor kecepatan

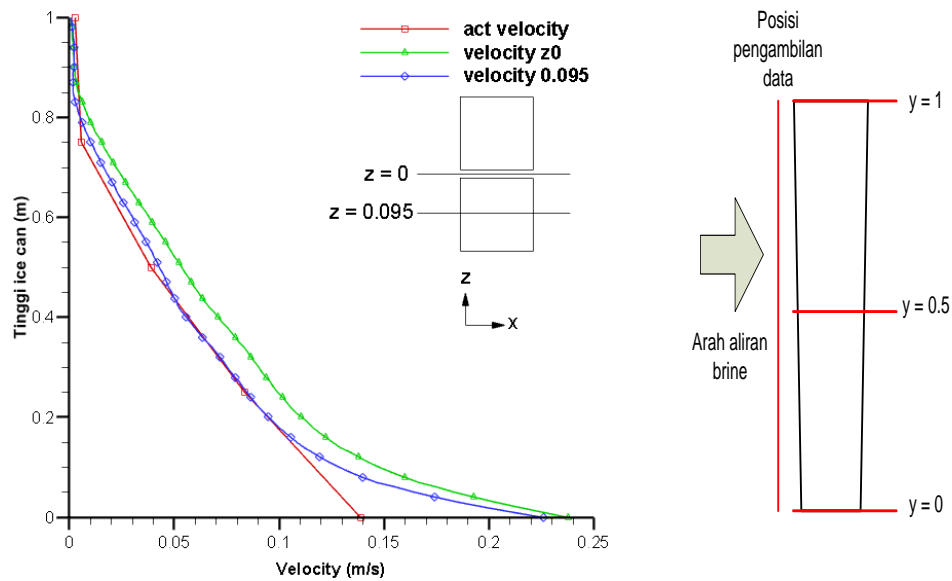




Gambar 4.9 menampilkan kontur kecepatan dan *pathline* dengan adanya vektor kecepatan pada pandangan samping (*XY-plane*) untuk geometri *square* dan *rectangular*. Kontur kecepatan yang melewati *can* pada geometri *square* ditampilkan pada Gambar 4.9 (a), dari kontur kecepatan dapat dilihat bahwa kecepatan aliran tertinggi berada di bawah jajaran *can* yang ditandai dengan warna merah dan merah muda. Kecepatan aliran dominan menuju ke arah bawah karena bentuk geometri cetakan yang mempunyai dimensi lebih kecil di bagian bawah *can*. Arah aliran menuju ke arah bawah tersebut diperkuat dengan bentuk vektor kecepatan dan *pathline* dengan posisi yang sama (Gambar 4.9 b). Arah vektor kecepatan cenderung kebagian bawah *can*. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran di depan *can* bagian depan semakin tinggi untuk bagian bawah. Pada bagian belakang *can 2* yang terdapat pada Gambar 4.9 (b) di posisi  $y = 0$  yang ditunjukkan oleh huruf “A” terjadi aliran yang berputar (*vortex*) yang menandakan bahwa ada peningkatan turbulensi di daerah tersebut sehingga perpindahan panas yang terjadi juga semakin tinggi.

Kontur kecepatan untuk bentuk geometri *rectangular* dapat dilihat pada Gambar 4.9 (c). Kontur tersebut menunjukkan hal yang tidak jauh berbeda dengan kontur pada geometri *square*. Peningkatan kecepatan terjadi pada bagian bawah jajaran *ice can* karena geometri bagian bawah mempunyai luasan yang lebih kecil daripada luasan bagian atas. Arah vektor kecepatan yang terdapat pada geometri *rectangular* juga cenderung ke arah bawah semu pada bagian depan *can* tang terdapat. Seperti yang terjadi pada bentuk geometri *square* pada bagian belakang *can 2* terjadi aliran yang berputar akan tetapi lebih kecil seperti yang ditunjukkan pada huruf “B” di Gambar 4.9 (d). Bentuk *vortex* yang kecil ini dikarenakan energi kinetik yang dibawa oleh aliran sudah berkurang akibat jarak yang dilalui lebih panjang dan mengakibatkan perpindahan panas yang terjadi pada daerah tersebut menjadi lebih rendah.

#### 4.2.4 Perbandingan Kecepatan Aktual Dan Simulasi



Gambar 4.10 Perbandingan distribusi kecepatan aktual dan simulasi pada geometri *square* di depan *ice can* 1

Kecepatan pada daerah di depan *ice can* mempunyai perbedaan dari bagian atas ( $y = 1$ ) hingga bagian bawah ( $y = 0$ ). Gambar 4.10 menampilkan perbandingan distribusi kecepatan di depan *ice can* antara pengukuran secara aktual dan hasil dari simulasi numerik pada geometri *square*. Dari grafik perbandingan tersebut terlihat hasil distribusi kecepatan yang hampir sama untuk data aktual dan simulasi yaitu kecepatan terendah berada di sekitar *ice can* bagian atas ( $y = 1$ ) dan semakin meningkat pada bagian bawah ( $y = 0$ ). Distribusi kecepatan ini sesuai dengan kontur kecepatan pada Gambar 4.9 (a) dan arah vektor kecepatan pada Gambar 4.9 (b) yang mempunyai kecepatan tertinggi di bagian bawah *can* dan mempunyai arah ke bagian bawah *can*. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk menyerupai trapesium dengan geometri yang berbeda yaitu lebar di bagian atas dan sempit di bagian bawah sangat mempengaruhi distribusi kecepatan di depan *ice can*. Perbedaan kecepatan ini akan mempengaruhi perpindahan panas yang terjadi yaitu secara teoritis bagian paling bawah mempunyai perpindahan panas terbaik karena mempunyai kecepatan aliran yang tinggi dan penampang *ice can* yang sempit.

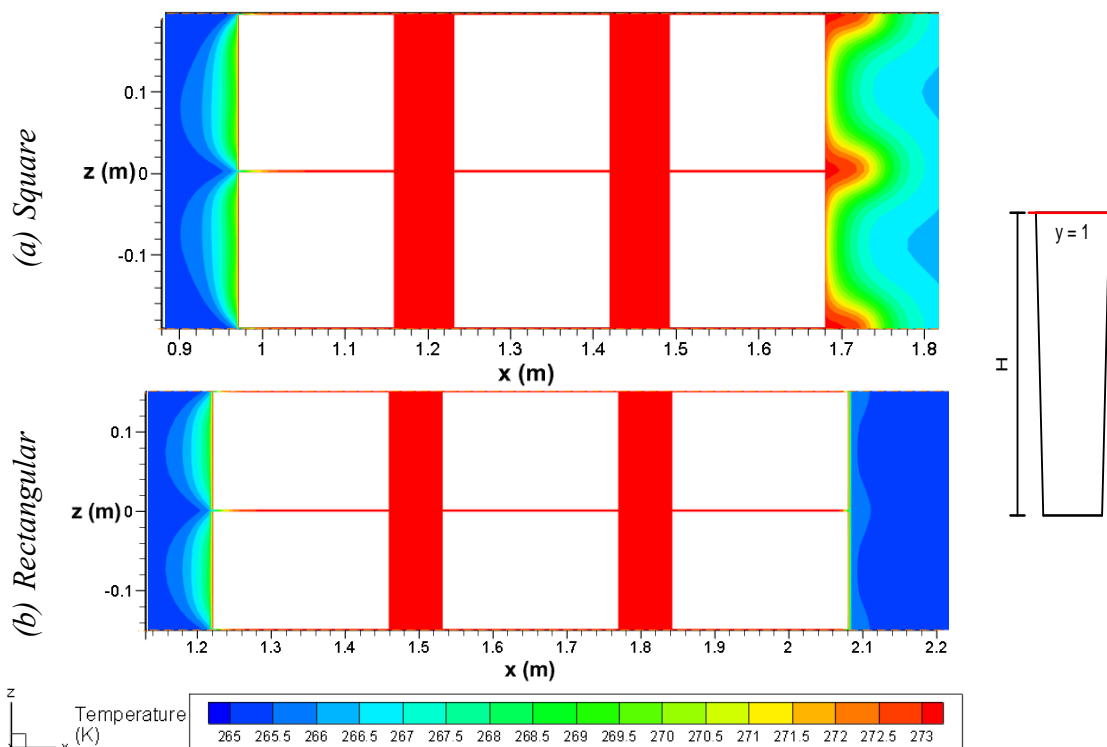


### 4.3 Karakteristik Perpindahan Panas Pada Cetakan Es Balok (*Ice Can*)

Pada sub bab ini akan dijelaskan mengenai karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada *brine* yang berinteraksi dengan dinding cetakan es balok (*ice can*) yang mempunyai bentuk dan ukuran seperti prisma dengan dimensi bagian atas lebih besar daripada bagian bawah dengan bentuk penampang bujursangkar (*square*) dan bentuk penampang persegi panjang (*rectangular*).

#### 4.3.1 Analisa Fenomena Fisis Perpindahan Panas Pada Cetakan Es Balok

Fenomena dan karakteristik perpindahan panas pada geometri *square* dan *rectangular* yang akan diuraikan pada bagian ini diawali dengan melakukan interpretasi pada data kualitatif berupa visualisasi aliran *brine* (kontur temperatur) pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ; dan  $y = 0$  dan selanjutnya ditampilkan data kuantitatif berupa *Nusselt number* lokal pada daerah sekitar *ice can* untuk memperkuat penjelasan fenomena data kualitatif tersebut.

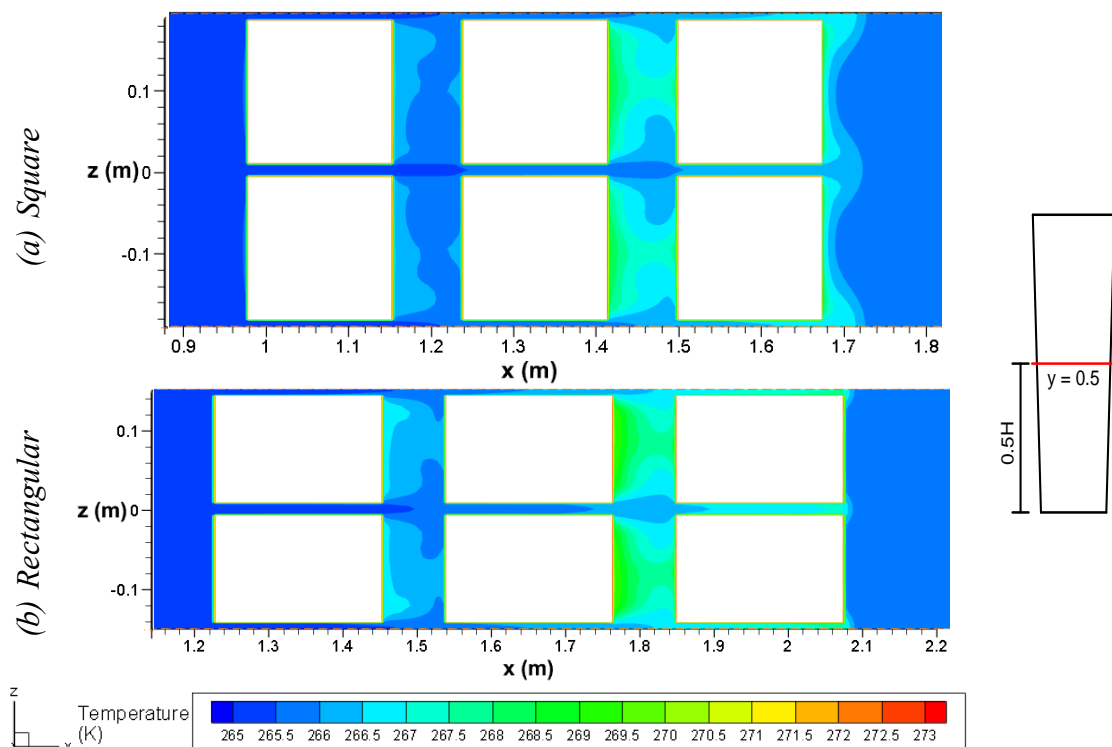


Gambar 4.11 Kontur temperatur tampak atas (*XZ-plane*) dengan posisi  $y = 1$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*

Data kualitatif berupa kontur temperatur pada geometri *square* ditunjukkan pada Gambar 4.11 (a) dimana pada sisi *inlet* aliran sebelum menumbuk baris *can*

terdepan warna biru masih mendominasi kemudian temperatur naik yaitu pada daerah setelah aliran menumbuk *can* terdepan yang mana terjadi degradasi warna secara bertahap ditandai dengan kontur warna merah yang menunjukkan terjadi peningkatan temperature aliran akibat mendapatkan panas dari dinding *can*. Rendahnya kecepatan aliran di posisi  $y = 1$  ini juga berkontribusi terhadap naiknya temperatur aliran *brine*. Selanjutnya pada daerah setelah baris *can* ke-3 terjadi degradasi bertahap terhadap temperatur *brine* yaitu terjadi peningkatan temperature kembali.

Pada bentuk geometri *rectangular* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11 (b) kontur temperatur menyerupai bentuk *square* yaitu terjadi peningkatan temperatur pada saat memasuki jajaran *ice can* dan sedikit berbeda dengan geometri *square* pada saat setelah melewati jajaran *ice can* kontur temperatur mengalami perubahan menurun lebih cepat pada daerah dekat dinding *can* bagian belakang. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan panas yang terjadi pada sisi belakang *can* tidak begitu bagus.

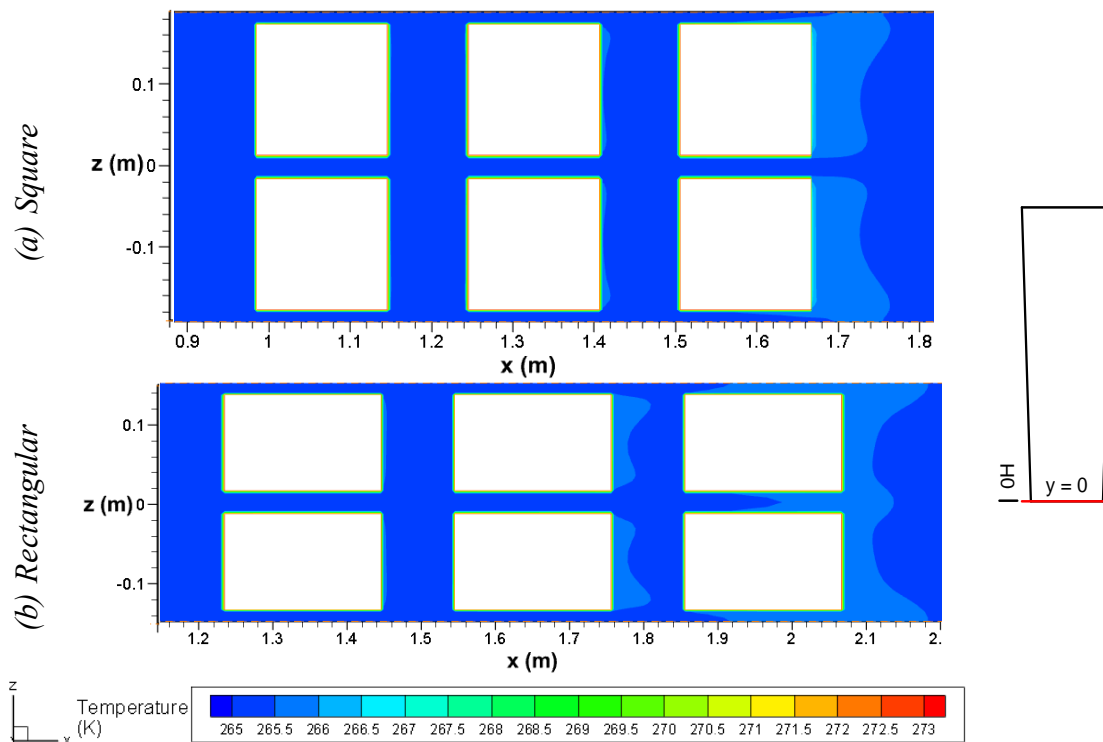


Gambar 4.12 Kontur temperatur tampak atas ( $XZ$ -plane) dengan posisi  $y = 0,5$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*



Kontur temperatur pada posisi  $y = 0,5$  ditunjukkan pada Gambar 4.12(a) untuk geometri *square* dimana pada sisi *inlet* sebelum menumbuk baris *can* terdepan warna biru masih mendominasi kemudian temperatur naik yaitu pada daerah setelah aliran menumbuk baris *can* ke-2 yang mana terjadi degradasi warna secara bertahap menandai terjadi peningkatan temperatur pada aliran di celah antar *can*. Profil *isotherm* terbentuk pada sisi tepi *can* pada setiap *can* yang menunjukkan bahwa terjadi perpindahan panas yang merata di setiap sisi cetakan.

Pada bentuk geometri *rectangular* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.12 (b) kontur temperatur menyerupai bentuk *square* yaitu terbentuk profil-profil *isotherm* pada sisi tepi cetakan dan pada celah baris *can* ke-3 terjadi peningkatan temperature aliran yang lebih tinggi dikarenakan lintasan yang dilalui aliran *brine* lebih panjang sehingga panas yang diserap aliran lebih banyak.



Gambar 4.13 Kontur temperatur tampak atas ( $XZ$ -plane) dengan posisi  $y = 0$  untuk bentuk (a) *Square* dan (b) *Rectangular*



Kontur temperatur pada bentuk *square* pada posisi  $y = 0$  ditunjukkan pada Gambar 4.13 (a). Warna di sekitar *can* didominasi oleh warna biru yang menandakan aliran *brine* di sekitar cetakan mempunyai temperatur yang rendah. Profil *isotherm* terbentuk merata di setiap sisi *can* yang menandakan perpindahan panas yang terjadi hampir merata di setiap *can*. Rendahnya temperatur di sekitar *can* di bagian bawah ini juga dipengaruhi oleh kecepatan aliran yang tinggi di bagian bawah *can* sehingga *brine* yang mempunyai temperatur lebih tinggi temperaturnya akan mengalami penurunan. Hal serupa juga terjadi pada kontur temperature di sekitar *can* pada geometri *rectangular* dengan posisi  $y = 0$  yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 (b) dimana profil *isotherm* terbentuk merata di semua sisi *can*. Perbedaan terdapat pada profil temperatur di celah *can* baris ke-3 yang mempunyai perbedaan temperatur. Hal ini menunjukkan terjadi perpindahan yang lebih baik jika dibandingkan dengan bentuk geometri *square*.

#### 4.3.2 Analisa Perbandingan *Nusselt number* Lokal Dan *Average* Pada Cetakan Es Balok

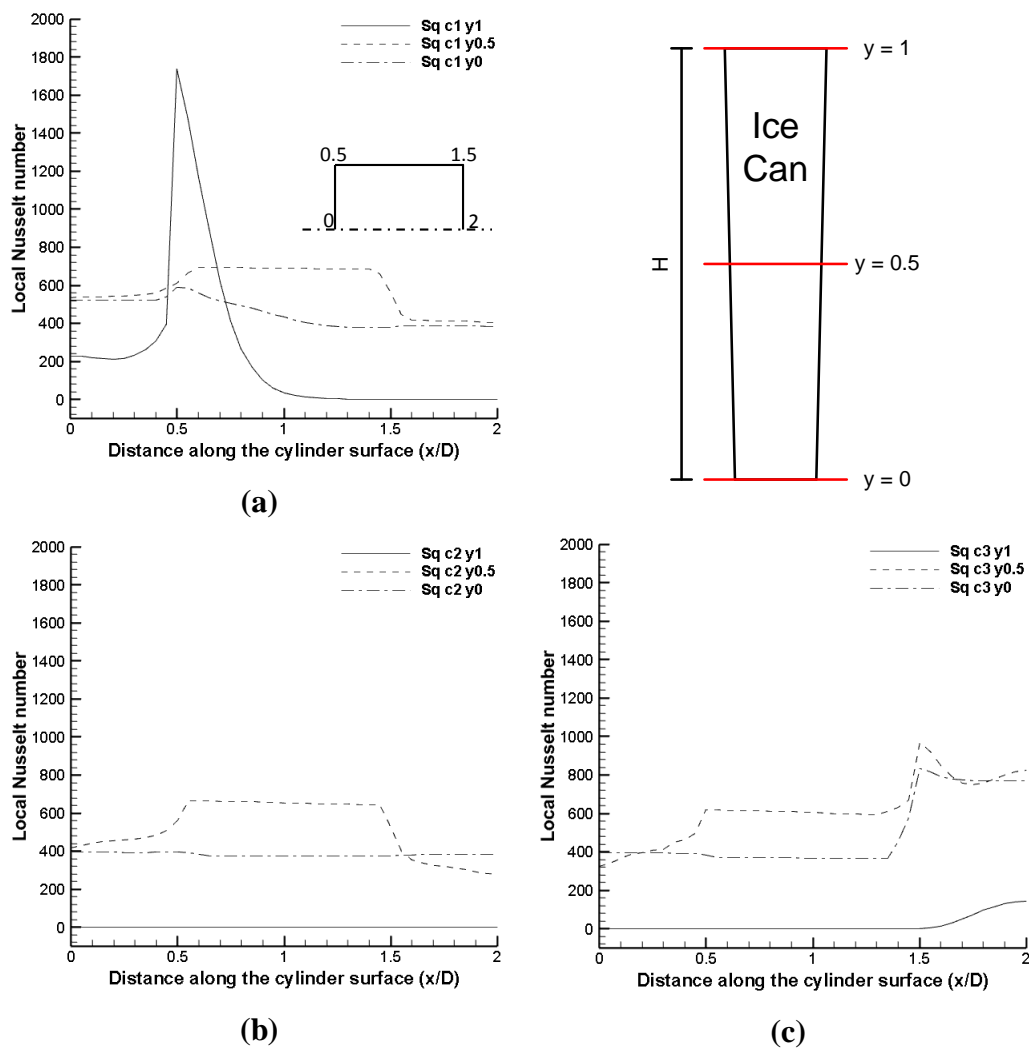
Untuk mengetahui besarnya perpindahan panas yang terjadi di sekitar *can* dapat ditampilkan secara kuantitatif dengan menggunakan *Nusselt number*. Data *Nusselt number* yang digunakan adalah *Nusselt number* lokal pada daerah sekitar dinding *ice can* yaitu pada sisi depan, samping, dan belakang *can*. Pengambilan data dilakukan secara 2 dimensi untuk tiap layer pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ;  $y = 0$ . Pada Gambar 4.14 menampilkan grafik *Nusselt number* lokal pada setengah permukaan *square cylinder* dengan berbagai posisi yaitu pada  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ; dan  $y = 0$ .

Analisa perpindahan panas pada daerah sekitar *ice can* untuk berbagai posisi dilakukan untuk mengetahui pada posisi mana perpindahan panas terbaik terjadi. Pada cetakan es balok (*ice can*) mempunyai geometri yang berbeda luas penampangnya yaitu besar di bagian atas dan kecil di bagian bawah. Perbedaan luas penampang inilah yang menjadi hal menarik untuk didiskusikan pada penelitian ini.

Gambar 4.14 menampilkan berbagai grafik distribusi *Nusselt number* untuk *can* 1, *can* 2, dan *can* 3 pada berbagai posisi untuk penampang luasan *square*. Besar *Nusselt number* lokal yang terjadi berbeda-beda untuk setiap *ice can*. Pada beberapa



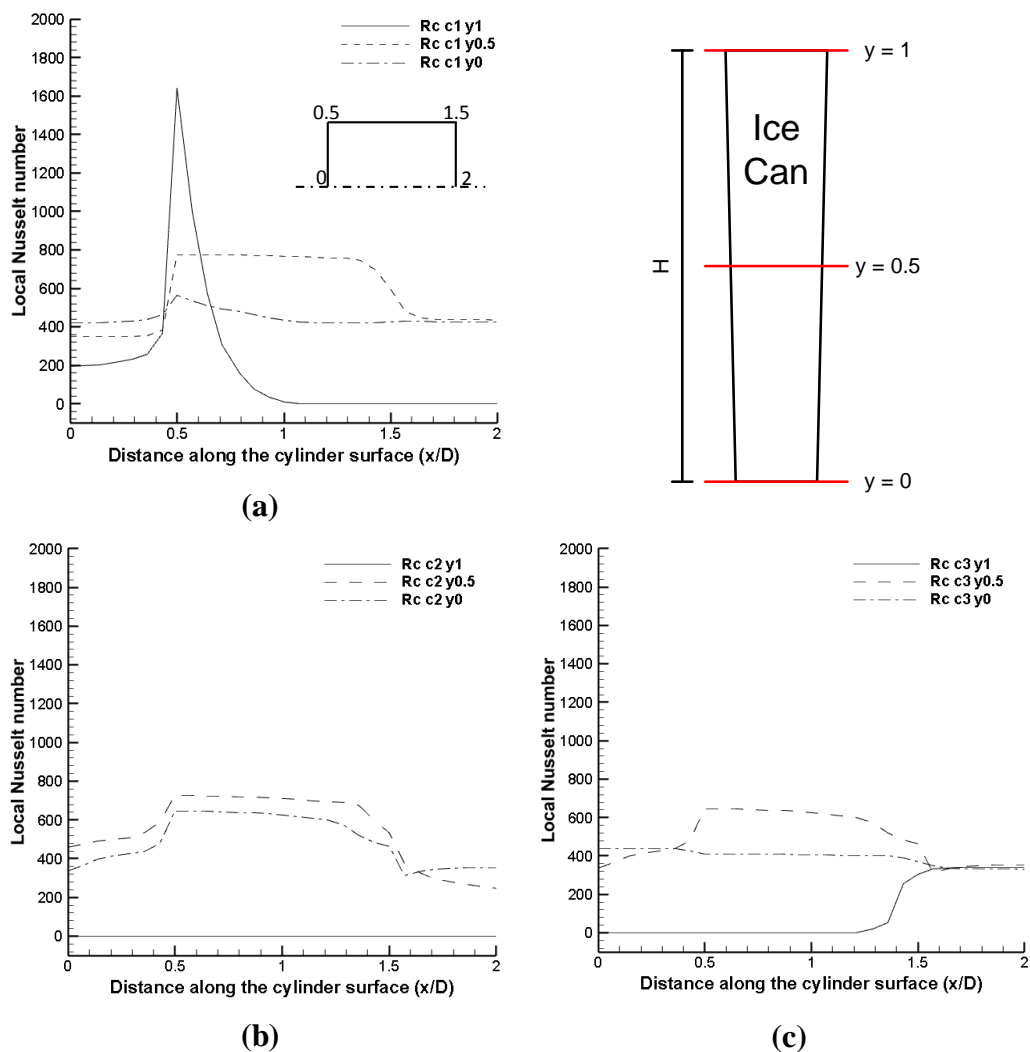
grafik mempunyai tren yang sama yaitu pada bagian permukaan depan mengalami peningkatan maksimum hingga titik *corner* (saat  $x/D = 0,5$ ), kemudian pada sisi samping *Nusselt number* mengalami penurunan tapi tidak signifikan bahkan ada yang cenderung konstan hingga titik  $x/D = 1,5$  pada *trailing edge* kemudian pada posisi bagian permukaan belakang mengalami penurunan untuk posisi  $y = 1$  dan  $y = 0,5$  serta mengalami peningkatan pada posisi  $y = 0$ . *Nusselt number* lokal terbesar terjadi pada sisi samping dan untuk bagian permukaan depan dan belakang mempunyai besar *Nusselt number* lokal yang hampir sama.



Gambar 4.14 *Nusselt number* lokal (a) *Ice can* 1, (b) *Ice can* 2, (c) *Ice can* 3 pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ;  $y = 0$  untuk penampang *square*



Secara menyeluruh perpindahan panas tertinggi terjadi pada *ice can* 1 kemudian diikuti oleh *ice can* 3 dan terendah terjadi pada *ice can* 2. Jika dilihat berdasarkan posisi maka perpindahan panas terbaik terjadi pada posisi di bagian tengah ( $y = 0,5$ ) untuk ketiga *ice can*. Kondisi pada bagian atas mempunyai *Nusselt number* terendah diakibatkan karena sempitnya celah antar can yang mengakibatkan rendahnya kecepatan aliran *brine* yang akan menyerap panas dinding *ice can*. Sesuai pada Gambar 4.6 (a) pada bagian tengah ( $y = 0,5$ ) terjadi



Gambar 4.15 *Nusselt number* lokal (a) *Ice can* 1, (b) *Ice can* 2, (c) *Ice can* 3 pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ;  $y = 0$  untuk penampang *rectangular*





*vortex* di bagian belakang *can* yang diakibatkan adanya *shear flow* dari celah antar *can* sehingga memicu semakin turbulen aliran yang melewati *can* pada posisi tersebut. Semakin turbulen aliran menyebabkan perpindahan panas semakin baik sehingga pada posisi  $y = 0,5$  mempunyai *Nusselt number* tertinggi. Pada bagian bawah ( $y = 0$ ) mempunyai *Nusselt number* yang menengah. Secara aktual perpindahan panas terbaik seharusnya terjadi pada *ice can* bagian bawah. Lebih rendahnya *Nusset number* pada bagian ini terjadi karena aliran yang melewati bagian bawah *ice can* mempunyai kecepatan aliran yang tinggi sehingga akan menarik aliran dan panas yang terjadi pada posisi  $y = 0$  ke bagian bawah dan menyebabkan berkurangnya nilai *Nusselt number*.

Analisa perpindahan panas pada penampang *ice can* dengan bentuk *rectangular* juga disajikan dalam bentuk grafik *Nusselt number* lokal di sekitar *ice can*. Gambar 4.15 menampilkan berbagai grafik distribusi *Nusselt number* untuk *can 1*, *can 2*, dan *can 3* pada berbagai posisi untuk penampang luasan *rectangular*. Besar *Nusselt number* lokal yang terjadi berbeda-beda untuk setiap *ice can*. Pada beberapa grafik mempunyai tren yang sama yaitu pada bagian permukaan depan mengalami peningkatan maksimum hingga titik *corner* (saat  $x/D = 0,5$ ), kemudian pada sisi samping *Nusselt number* mengalami penurunan tapi tidak signifikan bahkan ada yang cenderung konstan hingga titik  $x/D = 1,5$  pada *trailing edge* kemudian pada posisi bagian permukaan belakang secara umum mengalami penurunan. *Nusselt number* lokal terbesar terjadi pada sisi samping dan untuk bagian permukaan depan menengah kemudian bagian belakang mempunyai *Nusselt number* terendah.

Secara menyeluruh perpindahan panas tertinggi terjadi pada *ice can 1* kemudian diikuti oleh *ice can 2* dan terendah terjadi pada *ice can 3*. Jika dilihat berdasarkan posisi maka perpindahan panas terbaik terjadi pada posisi di bagian tengah ( $y = 0,5$ ) untuk ketiga *ice can*. Kondisi pada bagian atas mempunyai *Nusselt number* terendah diakibatkan karena sempitnya celah antar *can* yang mengakibatkan rendahnya kecepatan aliran *brine* yang akan menyerap panas dinding *ice can*. Sesuai pada Gambar 4.6 (b) pada bagian tengah ( $y = 0,5$ ) terjadi pusaran aliran di bagian belakang *can* yang memicu semakin turbulen aliran yang melewati *can* pada posisi tersebut. Semakin turbulen aliran menyebabkan



perpindahan panas semakin baik sehingga pada posisi  $y = 0,5$  mempunyai *Nusselt number* tertinggi. Pada bagian bawah ( $y = 0$ ) mempunyai *Nusselt number* yang menengah. Lebih rendahnya *Nusset number* pada bagian ini terjadi karena aliran yang melewati bagian bawah *ice can* mempunyai kecepatan aliran yang tinggi sehingga akan menarik aliran dan panas yang terjadi pada posisi  $y = 0$  ke bagian bawah dan menyebabkan berkurangnya nilai *Nusselt number*.

Tabel 4.1 *Surface Nusselt number* pada permukaan *ice can* geometri *square*

y pos.	can 1	can 2	can 3	Avg
0	497.00	431.93	644.31	524.41
0.5	653.58	579.56	687.04	640.06
1	279.57	0.60	28.43	102.59

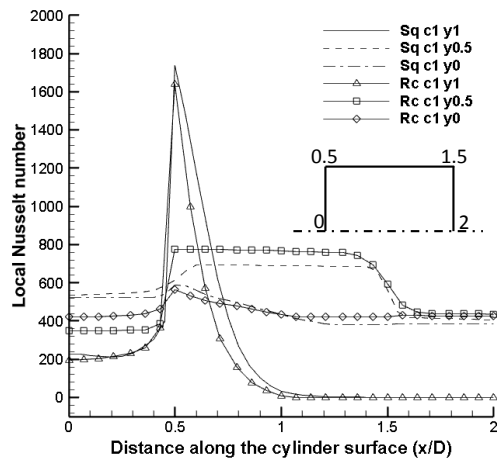
Tabel 4.2 *Surface Nusselt number* pada permukaan *ice can* geometri *rectangular*

y pos.	can 1	can 2	can 3	Avg
0	500.06	488.55	460.38	652.52
0.5	714.45	664.13	578.99	483.00
1	215.86	0.05	75.09	97.51

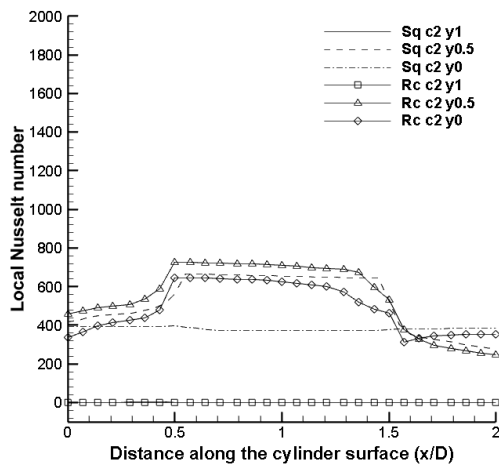
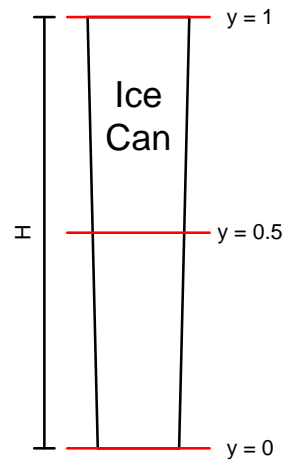
*Nusselt number average* per posisi fungsi ketinggian ditampilkan pada Tabel 4.1 untuk geometri *square* dan Tabel 4.2 untuk geometri *rectangular*. Dari kedua tabel tersebut dapat dilihat bahwa *Nusselt number* lokal dengan bentuk *square* lebih tinggi nilainya pada posisi  $y = 1$  dan  $y = 0,5$  untuk *can* 1, 2, dan 3 dan bentuk *rectangular* mempunyai nilai yang lebih tinggi pada posisi  $y = 0$ .

Tabel 4.3 Nilai *surface Nusselt number* pada permukaan semua *ice can*

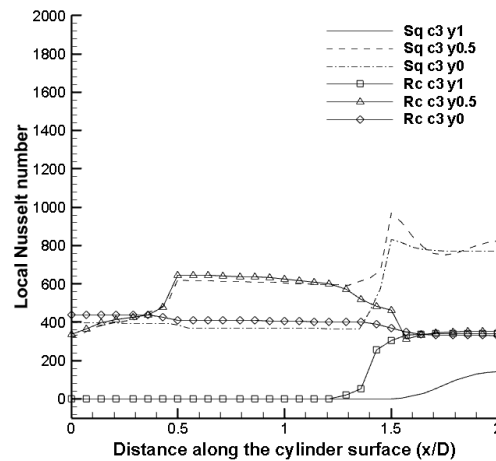
Square			Rectangular		
can	Nu <sub>s</sub>	h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> K)	can	Nu <sub>s</sub>	h <sub>s</sub> (W/m <sup>2</sup> K)
1	672.02	301.73	1	706.51	317.22
2	482.22	216.51	2	521.12	233.98
3	548.63	246.33	3	437.03	196.22
4	672.02	301.73	4	706.51	317.22
5	482.21	216.51	5	521.12	233.98
6	550.38	247.11	6	437.04	196.23
Avg	567.91	254.99	Avg	554.89	249.14



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.16 Perbandingan *Nusselt number* lokal untuk penampang *square* dan *rectangular* (a) *Ice can* 1, (b) *Ice can* 2, (c) *Ice can* 3 pada posisi  $y = 1$ ;  $y = 0,5$ ; dan  $y = 0$

Perbandingan besarnya distribusi *Nusselt number* lokal antara geometri *square* dan *rectangular* secara grafik ditunjukkan oleh Gambar 4.16 (a), (b), dan (c). *Nusselt number* lokal dengan bentuk *square* berada lebih tinggi nilainya pada posisi  $y = 1$  dan  $y = 0,5$  untuk *can* 1, 2, dan 3 sedangkan untuk posisi  $y = 0$  bentuk *rectangular* mempunyai posisi yang lebih tinggi. Besarnya *surface Nusselt number* dan *surface heat transfer coefficient* untuk seluruh permukaan *ice can* juga



dipaparkan pada Tabel 4.3. Pada tabel tersebut dapat diketahui untuk besar *surface Nusselt number* pada setiap *ice can* untuk geometri *square* dan *rectangular*.

Hasil *average* dari ke-enam *ice can* maka bentuk geometri *square* mempunyai *surface Nusselt number average* dan *surface heat transfer coefficient* lebih tinggi sebesar 567,91 dan 254.99 ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ), jika dibandingkan dengan bentuk geometri *rectangular* yang mempunyai *surface Nusselt number average surface heat transfer coefficient* lebih rendah sebesar 554.89 dan 249.14 ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ). Dari kedua nilai ini dapat disimpulkan dari simulasi bahwa perpindahan panas yang terjadi pada cetakan es balok (*ice can*) bentuk geometri *square* lebih baik dari bentuk geometri *rectangular*.



*(halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan secara simulasi dengan pembahasan hasil maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kecepatan aliran tertinggi terjadi pada geometri *square* terdapat di celah antar *can* dengan kecepatan aliran tertinggi untuk posisi  $y = 1$  pada  $x/D = 0.75$  adalah  $u/U_{max} = 0.016$ ; posisi  $y = 0.5$  pada  $x/D = 0.75$  adalah  $u/U_{max} = 0.37$ ; posisi  $y = 0$  pada  $x/D = 0.5$  adalah  $u/U_{max} = 0.75$ .
2. Dari kedua geometri kecepatan aliran terendah terdapat pada posisi  $y = 1$ , semakin tinggi ke posisi  $y = 0.5$  dan mempunyai kecepatan tertinggi pada posisi  $y = 0$  karena bentuk geometri *ice can* yang mempunyai penampang besar di bagian atas dan kecil pada bagian bawah.
3. Terjadi *secondary flow* berupa *vortex* pada bagian belakang *can* baris ke-2 dan *can* baris ke-3 untuk geometri *square* dan *rectangular* pada posisi  $y = 0.5$  dan  $y = 0$  yang akan meningkatkan terjadinya perpindahan panas pada dinding bagian depan dan belakang *can* 2.
4. Perpindahan panas yang terjadi dinyatakan dengan *Nusselt number*, pada posisi  $y = 1$  dan  $y = 0.5$  *Nusselt number* lokal *average* tertinggi dimiliki oleh geometri *square* yaitu 102.59 dan 640.06 sedangkan pada posisi  $y = 0$  *Nusselt number* lokal *average* tertinggi dimiliki oleh geometri *rectangular* yaitu sebesar 652.52.
5. Secara keseluruhan dari hasil *average* ke-enam *ice can* maka bentuk geometri *square* mempunyai *surface Nusselt number average* dan *surface heat transfer coefficient* lebih tinggi sebesar 567,91 dan 254.99 (W/m<sup>2</sup>K), jika dibandingkan dengan bentuk geometri *rectangular* yang mempunyai *surface Nusselt number average* *surface heat transfer coefficient* lebih rendah sebesar 554.89 dan 249.14 (W/m<sup>2</sup>K) sehingga perpindahan panas terbaik terjadi pada geometri *square*.

## 5.2 Saran


Penelitian mengenai analisa karakteristik aliran dan perpindahan panas melintasi *bluff body* dengan bentuk *square/rectangular* akan banyak dilakukan untuk aplikasi di industri. Untuk penelitian selanjutnya dengan topik yang sama menggunakan simulasi numerik, ada beberapa yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Penggunaan *meshing* harus diperhatikan, sebaiknya dilakukan *grid independent analysis* yang lebih baik untuk mengamati fenomena yang terjadi pada permukaan *square/rectangular cylinder* agar hasil numerik yang diperoleh lebih detail.
2. Untuk *bluff body* dengan bentuk geometri yang tidak umum perlu dilakukan eksperimen sebagai pembandingan untuk melakukan validasi dari hasil simulasi numerik yang diperoleh.
3. Perlu dilakukan variasi *blockage ratio*  $SL/D$  dan  $ST/D$  pada kedua geometri agar diperoleh konfigurasi terbaik agar dapat meningkatkan perpindahan panas pada *ice can*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. R. Ahmed and M. Yovanovich, "Analytical method for forced convection from flat plates, circular cylinders, and spheres," *J. Thermophys. Heat Transf.*, vol. 9, no. 3, pp. 516–523, 1995.
- [2] G. R. Ahmed and M. M. Yovanovich, "Experimental Study of Forced Convection From Isothermal Circular and Square Cylinders and Toroids," *J. Heat Transfer*, vol. 119, no. 1, p. 70, 1997.
- [3] B. Paliwal, A. Sharma, R. P. Chhabra, and V. Eswaran, "Power law fluid flow past a square cylinder: momentum and heat transfer characteristics," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 58, no. 23–24, pp. 5315–5329, 2003.
- [4] P. Taylor, A. Sharma, and V. Eswaran, "Heat and Fluid Flow Across a Square Cylinder in the Two- Dimensional Laminar Flow Regime," *Numer. Heat Transf. Part A Appl.*, no. June 2015, pp. 37–41, 2010.
- [5] Hartnett. James P. and Irvine. Thomas Jr.F, "Advances in Heat Transfer," New York, *Academic Press.*, vol. 8, 2015.
- [6] D. Chatterjee and S. Amiroudine, "Two-dimensional mixed convection heat transfer from confined tandem square cylinders in cross-flow at low Reynolds numbers," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 1, pp. 7–16, 2010.
- [7] M. M. Zdravkovich, "The effects of interference between circular cylinders in cross flow, Norweg," *J. Fluids Struct.*, vol. 1, no. 2, pp. 239–261, 1987.
- [8] A. K. Sahu, R. P. Chhabra, and V. Eswaran, "Effects of Reynolds and Prandtl numbers on heat transfer from a square cylinder in the unsteady flow regime," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 52, no. 3–4, pp. 839–850, 2009.
- [9] Rao, Koteswara, C. Sasmal, A. K. Sahu, R.P. Chhabra, V. Eswaran, "Effect of Power-law fluid behaviour on momentum and heat transfer characteristics of an inclined square cylinder in steady flow regime," *International Journal Heat and Mass Transfer.*, vol. 54, pp. 2854-2867, 2011.



BIODATA PENULIS	
	Nama : Arrad Ghani Safitra
	Tmpt, Tgl. Lahir : Cilacap, 13 Mei 1989
	Alamat : Jl Perwira Gang Taruna No. 137 RT.03 RW.01 Cilacap, Jawa Tengah 53223
	No. HP : 085 647 659 956
	e-mail : <a href="mailto:arrad.safitra@gmail.com">arrad.safitra@gmail.com</a> <a href="mailto:arradgs@pens.ac.id">arradgs@pens.ac.id</a>

Arrad Ghani Safitra lahir di Cilacap pada tanggal 13 Mei 1989 adalah anak pertama dari pasangan Ngadirin Ahmed dan Kholimah. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN Sidakaya 4 Cilacap (1995-2001), SMPN 2 Cilacap (2001-2004), SMAN 3 Cilacap (2004-2007). Setelah lulus SMA penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta dan mengambil program D-3 dengan jurusan Teknik Mesin pada bidang studi Manufaktur. Selama kuliah D3 penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan dan praktikum. Selain itu penulis juga mengikuti organisasi dengan menjadi anggota BEM KM UGM di bagian PSDM. Setelah lulus D3 pada tahun 2010 penulis melanjutkan pendidikan di jenjang Sarjana di Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama duduk di bangku kuliah, penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan dan juga praktikum. Di jurusan Teknik Mesin penulis memilih Bidang Studi Konversi Energi. Penulis juga menjadi grader praktikum Teknik Pendingin di Laboratorium Teknik Pendingin dan Pengkondisian Udara Teknik Mesin FTI-ITS. Setelah lulus S1 Teknik Mesin ITS pada tahun 2013, penulis menjadi tenaga pengajar di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) di Prodi Sistem Pembangkit Energi. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan pendidikan di jenjang Magister Teknik di Jurusan Teknik Mesin ITS pada bidang Rekayasa Konversi Energi (RKE). Di akhir studi penulis melakukan penelitian tesis di bidang energi mengenai karakteristik aliran dan perpindahan panas yang terjadi pada cetakan es balok (*ice can*).